

Resum

Aquest projecte s'engloba en el marc de la *Formula Student*. Una competició universitària on estudiants d'arreu del món dissenyen i construeixen un monoplaça de competició tant de combustió interna com elèctric per després competir entre elles. Aquest és el cas de l'ETSEIB MOTORSPORT; l'equip de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona que des de l'any 2011 i amb el seu cinquè cotxe, es va passar a la tecnologia elèctrica.

La temporada 2014-2015 l'equip va obtenir molt bons resultats amb el CAT08e coronant-se com a millor equip elèctric de l'estat. El monoplaça, però, va presentar problemes de sobreescalfament de la bateria.

El principal objectiu d'aquest projecte doncs, és aconseguir millorar la refrigeració de la bateria del CAT08e per a implementar-la al CAT09e tot respectant la estricta normativa que imposa la competició de la *Formula Student*.

Per a fer-ho s'ha estudiat com reduir la generació de calor a través de la proposta de variar paràmetres de disseny com les cel·les que conformen la bateria o els elements que confeccionen la connexió en forma de bus-bars. També s'han realitzat experiments al laboratori per tal de millorar el contacte entre els borns de les cel·les i les bus-bars ja que aquest contacte es realitza fent pressió uns contra les altres.

Seguidament, s'ha estudiat una nova configuració de ventiladors per tal d'extreure un major cabal d'aire amb el mateix consum d'energia elèctrica.

Per acabar s'ha estudiat a fons els diferents models de CFD per tal de poder simular la bateria. Finalment s'ha optat pel programari FlowSimulation de SolidWorks per la seva gran versatilitat, bona malla i facilitat de treballar-hi. Així, s'han estudiat les condicions de contorn per a fer-les el més exactes a la realitat possibles i posteriorment s'han simulat diferents dissenys de refrigeració per tal d'optimitzar-la.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	13
2.1. Introducció a la Formula Student	13
2.2. Característiques de la competició	14
2.3. Origen del projecte	18
2.4. Motivació	18
3. INTRODUCCIÓ	19
3.1. Objectius del projecte	19
3.2. Abast del projecte	19
4. CAT08E	21
4.1. Descripció de la bateria del CAT08e	21
4.2. Descripció de la refrigeració de la bateria del CAT08e	25
4.3. Anàlisi refrigeració CAT08e i possibles camins de millora	28
5. REDUIR LA GENERACIÓ DE CALOR	31
5.1. Cel·les	31
5.2. Bus-bars	33
5.3. Contacte entre cel·les i bus-bars (Experiment)	36
5.3.1. Disseny del muntatge	38
5.3.2. Construcció de muntatge	42
5.3.3. Experiment de la distribució de cargols	44
5.3.4. Experiment de les pastes tèrmiques	47
6. EXTREURE UN MAJOR CABAL D'AIRE	57
7. CIRCULACIÓ MÉS EFICIENT	61
7.1. Bases teòriques i CFD	61
7.1.1. Del continu al discret	64
7.1.2. Turbulència	64
7.2. Estat de l'art	69
7.3. Simulacions	71
7.3.1. Concepte de la refrigeració de la bateria del CAT09e	81

7.3.2. Reduir la pèrdua de càrrega	88
7.3.3. Distribució superfície d'entrada.....	95
7.4. Anàlisi solució final	105
8. CONCLUSIONS	109
8.1. Anàlisi de resultats.....	109
8.2. Futures línies de treball	110
9. ESTUDI ECONÒMIC	113
10. IMPACTE AMBIENTAL	115
11. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	117
AGRAÏMENTS	119
BIBLIOGRAFIA.....	121
Referències bibliogràfiques.....	121
Bibliografia complementària.....	122

1. Glossari

Símbols i variables

A_i : Àrea de l'element i

α : Difusivitat tèrmica del material

α_{Cu} : Coeficient corrector de la resistivitat en funció de la temperatura

BMS: Battery Management System

Cabal n : Cabal amb el que s'ha realitzat la simulació

Cabal $n+1$: Cabal actualitzat per a la següent simulació

CAT07e: Monoplaça elèctric de la temporada 2013-14 de l'ETSEIB MOTORSPORT

CAT08e: Monoplaça elèctric de la temporada 2014-15 de l'ETSEIB MOTORSPORT

CAT09e: Monoplaça elèctric de la temporada 2015-16 de l'ETSEIB MOTORSPORT

C_p : Calor específica (J/Kg·K)

D : Diàmetre

∇P : Gradient de pressió

ϵ : Dissipació turbulenta

ESF: Electrical Safety Form

g : Gravetat

Global Temperature: Temperatura global el sistema

GLVS: Grounded Low Voltage System (Tots els sistemes del cotxe que treballen a menys de 60 VDC)

High Voltage: Qualsevol sistema que treballi a més de 60 VDC

I : Intensitat que circula pel sistema

k : Energia cinètica turbulenta

l : Longitud total de conductor

$N_{\text{cel·les}}$: Número de cel·les de la bateria

NTC: Termistor NTC (Negative Temperature Coefficient) Sensor de temperatura

μ : Viscositat dinàmica del fluid

ω : Rati de dissipació de l'energia turbulenta

pcb: (Printed Circuit Board) Placa de circuit imprès

P_i : Pressió al punt i

P_{dis} : Potència dissipada en forma de calor

Q : Cabal volumètric

R_{cond} : Resistència elèctrica del conductor

Re_i : Nombre de Reynolds al punt i

Ready to Drive Sound: So que ha de fer un cotxe elèctric quan té el sistema tractiu encès

R_{int} : Resistència interna de les cel·les

ρ : Densitat del fluid

ρ_i : Resistivitat del material i

S : Superfície de secció del conductor

Stack: Divisió física d'un conjunt de cel·les que formen el conjunt de la bateria

Surface Temperature: Temperatura de la superfície de sensat

T : Temperatura en K

Tractive System: Sistema d'alt voltatge que propulsa el cotxe

Turbulent Viscosity i : Viscositat turbulenta a la superfície i

\vec{u} : Vector velocitat

V_i : Velocitat al punt i

ν : Viscositat del fluid

ν_T : Viscositat turbulenta del fluid

VDC: Voltatge de contínua

z_i : Alçada del punt i

Índex de Figures

Figura 2.1	Imatge de la prova del Tilt Test	14
Figura 2.2	Imatge de la prova del Tilt Test	15
Figura 2.3	Dimensions de la prova de l'Skid Pad [1]	16
Figura 4.1	CAT08e.....	21
Figura 4.2	Bateria CAT08e	22
Figura 4.3	Posició de la bateria al CAT08e.....	22
Figura 4.4	Cel·la Melasta SLPBA843126	23
Figura 4.5	Connexions de potència	24
Figura 4.6	Stack.....	25
Figura 4.7	Refrigeració de la bateria del CAT08e.....	26
Figura 4.8	Plànol disposició forats CAT08e	26
Figura 4.9	Representació visual de la línia inferior de forats	27
Figura 4.10	Esquema línies de corrent CAT08e.....	27
Figura 4.11	Funcionament d'un tub de calor [9]	29
Figura 5.1	Detall del contacte entre bus-bar i borns	36

Figura 5.2	Detall del contacte entre bus-bar i borns doblegats	37
Figura 5.3	Conseqüències incident descàrrega.....	37
Figura 5.4	Conseqüències incident descàrrega.....	38
Figura 5.5	Configuració 2s3p experiment	39
Figura 5.6	Càrrega electrònica hp 6050A	39
Figura 5.7	Piròmetre digital.....	40
Figura 5.8	Arduino Mega 2560	40
Figura 5.9	Esquema de sensats de l'experiment.....	41
Figura 5.10	Interfície gràfica del sensat dels experiments.....	42
Figura 5.11	Modificació de la placa de connexions	42
Figura 5.12	Placa de connexions per als experiments	43
Figura 5.13	Part inferior del muntatge de l'experiment.....	43
Figura 5.14	Muntatge complet de l'experiment.....	44
Figura 5.15	Distribució de cargols del CAT08e	44
Figura 5.16	Distribució de cargols del CAT09e	45
Figura 5.17	Resultats experiment distribució de cargols	46
Figura 5.18	Muntatge proves preliminars	49
Figura 5.19	Muntatge prova preliminar pasta TcZn-060.....	49
Figura 5.20	Resultats prova preliminar pasta TcZn-060.....	50
Figura 5.21	Muntatge prova preliminar pasta Silver Ice 710	50
Figura 5.22	Resultats prova preliminar pasta Silver Ice 710.....	51
Figura 5.23	Resultats experiment de control	52
Figura 5.24	Resultats experiment TcZn-060	52

Figura 5.25	Difusió de la pasta termo-conductora	53
Figura 5.26	Resultats experiment Silver-Ice 710	54
Figura 5.27	Resultats comparatius experiment de control i Silver-Ice 710	55
Figura 6.1	Disposició de ventiladors CAT08e	57
Figura 6.2	Proximitat de la bateria del CAT08e al motor	58
Figura 6.3	Disposició de ventiladors CAT09e	60
Figura 7.1	Mallat del SolidWorks després del refinament.....	69
Figura 7.2	Diferència entre mallat comú i el del SolidWorks	70
Figura 7.3	Diferència entre caixa real i simplificació per a simular	72
Figura 7.4	Diferència entre <i>stack</i> real i simplificació per a simular	72
Figura 7.5	Condicció de contorn de la generació a les cel·les	73
Figura 7.6	Condicció de contorn de la generació a les bus-bars.....	74
Figura 7.7	Corba de rendiment dels ventiladors OD4020.....	76
Figura 7.8	Corba de rendiment dels ventiladors OD2510.....	76
Figura 7.9	Gràfica coeficient de convecció vs velocitat d'aire [12].....	80
Figura 7.10	Mallat de la simulació.....	80
Figura 7.11	Línies de corrent refrigeració CAT08e.....	83
Figura 7.12	Distribució de temperatures del CAT08e en un tall de secció	84
Figura 7.13	Plànol explicatiu distribució <i>stack</i> CAT08e	85
Figura 7.14	Plànol explicatiu distribució <i>stack</i> CAT09e	85
Figura 7.15	Simulació base de la refrigeració del CAT09e.....	87
Figura 7.16	Placa superior i tapa amb forats arrodonits	88
Figura 7.17	Línies de corrent al voltant del BMS a 10 mm	90

Figura 7.18	Línies de corrent al voltant del BMS a 18 mm	91
Figura 7.19	Bus-bar encastada 1 mm	91
Figura 7.20	Bus-bar encastada 0,7 mm	92
Figura 7.21	Bus-bar encastada 0,5 mm	92
Figura 7.22	Representació ranures davanteres.....	93
Figura 7.23	Esquema dels tres casos d'estudi preliminar de distribució superior ...	97
Figura 7.24	Simulació amb ranures laterals	99
Figura 7.25	Esquema dels tres casos d'estudi de bypass inferior de ranures.....	101
Figura 7.26	Esquema dels tres casos d'estudi de posició línia superior.....	102
Figura 7.27	Esquema dels tres casos d'estudi de configuració línia superior	104
Figura 7.28	Plànol distribució de ranures CAT09e	106
Figura 7.29	Representació de temperatures en la superfície de sensat.....	106
Figura 7.30	Línies de corrent de la refrigeració del CAT09e	107
Figura 7.31	Distribució de temperatures del CAT09e en un tall de secció	107
Figura 7.32	Bateria del CAT09e	108
Figura 13.1	Diagrama de Gantt del projecte.....	117

Índex de Taules

Taula 2.1	Resum de puntuacions de la competició d'Alemanya [1]	17
Taula 5.1	Intensitat mitja quadràtica en l' <i>Endurance</i>	31
Taula 5.2	Característiques principals dels dos models de cel·les	32
Taula 5.3	Potència teòrica dissipada per ambdós models	32
Taula 5.4	Conseqüències de la variació d'amplada a les bus-bars.....	35
Taula 5.5	Resultats temperatura experiment distribució cargols.....	47
Taula 5.6	Característiques de les dues pastes tèrmiques.....	48
Taula 5.7	Resultats comparatius de control i Silver Ice 710	55
Taula 6.1	Consum refrigeració de la bateria del CAT08e.....	59
Taula 6.2	Consum refrigeració de la bateria del CAT09e.....	59
Taula 7.1	Recull de potències dissipades a cel·les i bus-bars.....	73
Taula 7.2	Valors de les condicions de contorn de cel·les i bus-bars	75
Taula 7.3	Generació a les bus-bars CAT08e i CAT09e.....	81
Taula 7.4	Resultats simulació refrigeració CAT08e.....	82
Taula 7.5	Paràmetres d'interès simulació refrigeració CAT08e.....	82
Taula 7.6	Diferències dels forats de la caixa entre CAT08e i CAT09e	86
Taula 7.7	Resultats simulació base CAT09e	87
Taula 7.8	Resultats simulació forats arrodonits	89
Taula 7.9	Resultats comparatius diferents alçades BMS.....	90
Taula 7.10	Resultats comparatius diferents gruixos d'encast de les bus-bars	93
Taula 7.11	Resultats comparatius forats davanters i ranures davanteres	94
Taula 7.12	Resultats diferents configuracions de forats d'entrada	95

Taula 7.13	Resultats diferents configuracions de la línia superior de forats	98
Taula 7.14	Resultats comparatius entre forats i ranures	100
Taula 7.15	Resultats comparatius estudi bypass inferior de ranures	102
Taula 7.16	Resultats comparatius estudi de posició línia superior	103
Taula 7.17	Resultats comparatius estudi de configuració línia superior	105
Taula 11.1	Anàlisi de costos de recursos humans i informàtics	113
Taula 11.2	Anàlisi de costos de material de l'experiment	114

2. Prefaci

2.1. Introducció a la Formula Student

La *Formula Student* és una competició d'enginyeria on equips d'universitats d'arreu del món competeixen entre ells al món del *Motorsport*. Els estudiants dissenyen i fabriquen un monoplaça de competició tot regint-se per les normes de FSAE que comprenen tant equips de combustió interna com elèctrics. La creixent popularitat d'aquesta competició rau en la gran llibertat que deixa la normativa en aspectes de disseny. Si bé sempre mantenint la seguretat, tant del pilot com de la resta de gent que pugui entrar en contacte amb el monoplaça.

La competició es basa en dos grans blocs de proves: les estàtiques i les dinàmiques.

Els seus inicis es remunten al 1981 a Texas participant tan sols 6 equips. El 1998 es mou a Europa, a Gran Bretanya, i des de llavors ha anat creixent fins el punt d'albergar 11 competicions i 520 equips, 137 dels quals, elèctrics, al 2015.

I és que en els darrers anys i ha hagut un gran auge d'equips que s'han passat al cotxe elèctric seguint la tendència mundial d'apostar per aquesta tecnologia en el sector de l'automoció.

Aquest va ser el cas de l'ETSEIB MOTORSPORT. Equip de Formula Student de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona fundat el 2007 pel Dr. Francesc Roure Fernández, que, el 2011, i després de 4 cotxes de combustió (CAT01, CAT02 CAT03 i CAT04), es va passar a la tecnologia elèctrica amb el CAT05e. El qual es va convertir en el primer cotxe purament elèctric de *Formula Student* a l'estat Espanyol. De fet, ETSEIB MOTORSPORT va ser el primer equip espanyol de Formula Student així com el primer en passar-se a la tecnologia elèctrica. Actualment, a Espanya, existeixen 18 equips 6 dels quals elèctrics.

I és que l'equip sempre ha apostat per la innovació, creant l'any passat el primer monocasc integral de fibra de carboni de Formula Student de l'estat.

A l'ETSEIB MOTORSPORT, a més, sempre s'ha apostat per anar més enllà de la simple competició. Des del principi s'ha optat per intentar dissenyar i construir el màxim nombre de peces possible i deixar l'obtenció d'elements comercials com a segona opció. D'aquesta manera s'aconsegueix un coneixement molt més ampli i una major adaptació de cada element del monoplaça alhora que es redueixen els costos.

2.2. Característiques de la competició

És tal el compromís amb la seguretat que per a competir a cada cursa és necessari passar primer les verificacions tècniques (*Scrutineering*). Aquestes tenen parts comunes per a combustió interna i elèctrics i altres de diferents.

Les comunes són les verificacions del *Mechanical Scrutineering* on es comprova que tots els elements del monoplaça compleixin les normes de seguretat i restriccions de mides. Després passen el *Tilt Test* (*Figura 2.1*), on s'inclina el cotxe 60° per a simular les forces laterals que tindria en una corba (1,7G) i el cotxe no ha d'aixecar cap roda de la plataforma.



Figura 2.1 Imatge de la prova del Tilt Test

Tots els cotxes també han de passar el *Break Test*. Test en el qual el cotxe ha de bloquejar les quatre rodes en una frenada.

Pel que fa a les verificacions específiques de cada categoria, els vehicles de combustió interna han de passar el *Sound Test* atès que el soroll màxim està limitat a 110dB.

Els monoplaços elèctrics, per la seva part, han de passar l'*Electrical Scrutineering*. Verificació en la qual comproven la seguretat elèctrica del cotxe per si sol i en front a fallides de components. Una altra verificació específica és el *Rain Test* (*Figura 2.2*).



Figura 2.2 Imatge de la prova del Tilt Test

Test en el qual el cotxe ha de suportar una simulació de pluja durant 5 minuts sense que salti cap protecció elèctrica per tal d'assegurar la seguretat del cotxe en cas de pluja a la pista.

Un altre test és el del *Ready To Drive Sound*. Test en la qual es comprova que el so al connectar el *Tractive System* sigui superior a 80dBA. Els monoplaques elèctrics tenen dos sistemes que cal connectar mitjançant claus per a que aquest es pugui moure. El primer és el *Grounded Low Voltage* que connecta la electrònica de 60 VDC o menys. I l'altre és l'anteriorment esmentat *Tractive System*, que connecta el sistema de *High Voltage* (bateria, inversor i motor). El *Ready To Drive Sound* és molt important ja que els cotxes elèctrics no emeten soroll quan estan en disposició de córrer. Per tant, és molt important que els cotxes emetin un so per avisar a tota persona que estigui a prop que aquell cotxe està preparat per córrer.

La Formula Student, com s'ha citat anteriorment, es caracteritza per ser una competició d'enginyeria, on es valoren altres aspectes a més de tenir un bon monoplaça per competir.

És per aquest motiu que la puntuació global de la competició es divideix en dos tipus de proves diferents. Per una banda hi ha les proves estàtiques, on es valora el treball de l'equip en diverses vessants:

- *Design*: És la prova més important de les estàtiques, on jutges especialitzats en diversos sectors de l'automoció avaluen el disseny del monoplaça i on es valora que cada element que incorpora el vehicle estigui justificat i sigui el més adient.
- *Business Plan*: Uns representants de l'equip exposen, davant uns jutges, un pla de negocis per tal de comercialitzar el monoplaça dissenyat.

- *Cost and Manufacturing Report*: Es tracta de la defensa dels costos de fabricació i tria del material de les peces que formen el monoplaça davant uns jutges.

Per altra banda també hi ha les proves dinàmiques, que són les proves on es demostra la competitivitat i el rendiment pur del vehicle dissenyat:

- *Acceleration*: Consta d'una acceleració de 75 metres, on el vehicle es troba parat a l'inici de la prova.
- *Skid Pad*: Es tracta d'una prova on el monoplaça ha de recórrer una pista en forma de vuit, com es pot observar a la *Figura 2.3*. D'aquesta manera s'aconsegueix avaluar el pas per corba dels diversos vehicles.

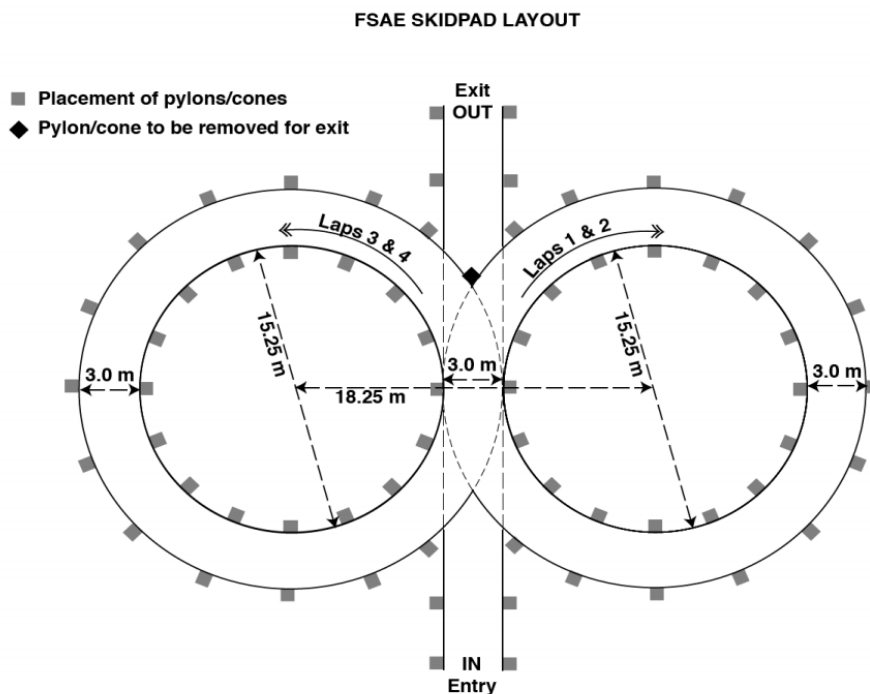


Figura 2.3 Dimensions de la prova de l'Skid Pad [1]

- *Autocross*: És una prova cronometrada, on els monoplaços han de realitzar una volta a un circuit de Formula Student (típicament molt estrets, revirats, marcats amb cons i d'1 km de longitud aproximadament) en el menor temps possible.
- *Endurance*: És la prova reina de les dinàmiques. Es realitza en un circuit molt similar al de l'*Autocross*, però en aquest cas s'ha de recórrer un total de 22 quilòmetres.
- *Efficiency*: La puntuació d'aquesta prova surt de l'energia consumida durant l'*Endurance*.

La puntuació de totes les proves es pot veure a la *Taula 2.1*:

Prova		Puntuació
Estàtiques	Design	150
	Business Plan	100
	Cost and Manufacturing Report	75
Dinàmiques	Acceleration	75
	SkidPad	50
	Autocross	150
	Endurance	300
	Efficiency	100
Total		1000

Taula 2.1 Resum de puntuacions de la competició d'Alemanya [1]

Al ser l'Endurance la prova més exigent, és pensant en aquesta prova per la que es dimensiona la refrigeració de la bateria.

2.3. Origen del projecte

El projecte neix amb la necessitat de millorar la refrigeració de les bateries del monoplaça. A la introducció d'una nova norma on les bateries no poden sobrepassar els 60°C se li afegeixen les dades de la temporada 2014-15, on la temperatura era superior a 65°C, tenint en compte que el ritme desplegat en aquella temporada no era massa elevat.

Amb l'anàlisi d'aquests dos factors va quedar palesa la necessitat d'una millora en aquest sistema per tal d'evitar possibles penalitzacions i permetre assolir al cotxe un ritme alt en competició. Per sort es compta amb la col·laboració de la empresa Orion Fans que subministra ventiladors a l'equip de forma gratuïta com a part d'un patrocini.

2.4. Motivació

A la gran evolució de les bateries en els darrers anys amb la importància que estan adquirint els vehicles elèctrics en el mercat, s'hi suma la gran evolució que estan patint darrerament els monoplaços de l'ETSEIB Motorsport. Així, cada cop es dissenyen cotxes més ràpids i estables que permeten anar més temps a màxima potència amb el consegüent augment del consum d'energia i per tant la major generació de calor.

En un món com el de la competició elèctrica on cada dècima compta i on tots els equips tenen problemes de refrigeració, el fet de disposar d'una refrigeració eficient pot ser un argument clau per imposar-se als competidors.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

Aquest projecte pretén analitzar tant la bateria com la seva refrigeració, del monoplaça de la temporada anterior, el CAT08e, tot analitzant els seus punts febles i els possibles camins de millora per aplicar-los en la fase de disseny del proper monoplaça, el CAT09e.

Un cop determinats aquests camins, s'explotaran un a un per tal d'aconseguir la màxima millora possible tot intentant que aquesta sigui adaptable al CAT09e, un monoplaça amb la mateixa base que el CAT08e.

3.2. Abast del projecte

En aquest projecte es pretén fer una anàlisi descriptiva tant de la bateria del CAT08e, com de la seva refrigeració, que permeti entendre el perquè de la seva estructura i el seu funcionament tant per part de decisions de disseny com per restriccions de normativa.

També s'esmentaran els problemes de temperatura que van sorgir i les seves possibles causes, per després trobar els possibles camins de millora que permetin reduir-la.

Aquests s'abordaran de la manera més adient per obtenir una millora preferiblement quantitativa o qualitativa en alguns casos.

No entra dintre aquest projecte el determinar la temperatura exacta de funcionament de la bateria, sinó només reduir-la.

4. CAT08e

El CAT08e és el vuitè monoplaça i el quart elèctric, dissenyat i construït per l'ETSEIB Motorsport (*Figura 4.1*).



Figura 4.1 CAT08e

L'any 2014 es va decidir fer un gran pas endavant introduint un gran nombre d'innovacions per aconseguir augmentar la competitivitat de l'equip. Entre elles estan el primer monocasc integral de fibra de carboni de la Formula Student de l'estat, un conjunt roda de 10 polzades que permet reduir inèrcies, un tren de potència simplificat i alleugerit i un *Package* de bateries completament nou i dissenyat des de zero.

4.1. Descripció de la bateria del CAT08e

Un dels canvis importants del CAT08e respecte el CAT07e és la unificació de la bateria en un sol *package*. Des del CAT06e les bateries s'havien dut en dues caixes bessones sobre cada banda del fons pla del cotxe. Això, era profitós per mantenir un centre de gravetat baix i un cotxe més estable en corba, però, el fet d'haver de duplicar la circuiteria de la caixa, afegia molt pes al cotxe. Així doncs, es va decidir simplificar el disseny i unificar les dues caixes en una (*Figura 4.2*), que aniria situada dintre el monocasc darrere l'esquena del pilot (*Figura 4.3*).



Figura 4.2 Bateria CAT08e

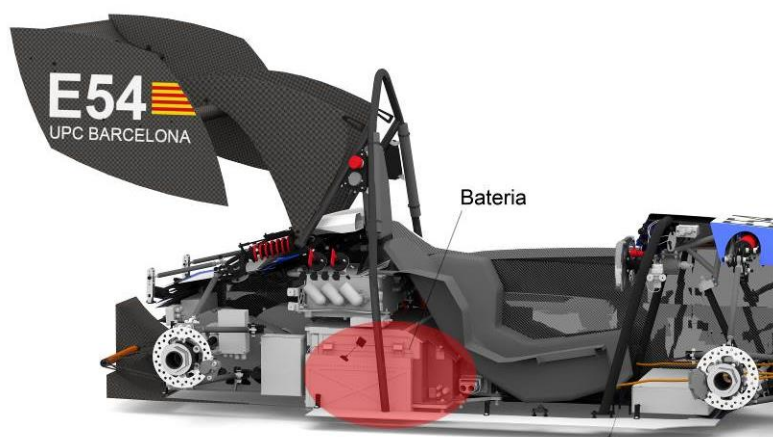


Figura 4.3 Posició de la bateria al CAT08e

Aquesta caixa és d'alumini 6082 de 2 mm de gruix. Això és degut a que la normativa imposa que la caixa ha de poder suportar desacceleracions de 20g en la vertical i 40g en les altres quatre direccions del pla paral·lel al terra [1].

Pel que es refereix a la estructura interna de la caixa, es poden distingir dues parts a simple vista de la *Figura 4.2*. La davantera, on està situada tota la circuiteria de la bateria, i la posterior; on s'hi allotgen les cel·les. Aquest projecte es centra, però, en la part posterior atès que és a la part de les cel·les on hi ha la major generació de calor.

La part posterior està envoltada per un *firewall* que compleix amb UL94-V0, FAR25 o equivalent [1] el qual no pot ser travessat per res. És per això pel que s'obviarà la part frontal de la caixa.

La configuració de les cel·les de la bateria es va decidir que fos de 95s3p per motius de voltatge màxim i energia. Això vol dir 95 grups en sèrie on cada grup està format per tres cel·les connectades en paral·lel. El valor del paral·lel es va decidir atès a les sol·licitacions de corrent de descàrrega en la prova de l'acceleració (pics de 380 A). I és que els pics de corrent malmeten molt les cel·les. De fet, les cel·les que es duïen al CAT07e, tenien una intensitat màxima de descàrrega recomanada de 95 A; que si es divideix el valor del pic de l'acceleració pel tres paral·lel per tal d'obtenir la intensitat de cada cel·la (126 A), queda palès que s'estaven sobrecarregant. És per això que es va passar de la configuració del CAT07e de dos paral·lel a una configuració amb un triple paral·lel pel CAT08e. Pel que fa a la sèrie, es va decidir en base a dos factors: l'espai del que es disposava va ser un. L'altre va ser pel motor. Atès que, aquest, havia d'estar alimentat a un valor proper als 400 volts [6] i, les cel·les, tenien un voltatge nominal de 4V [5].

A més, la normativa especifica que les cel·les han d'estar separades en segments aïllats tant elèctrica com tèrmicament de manera que cada segment contingui menys de 6MJ d'energia i 120VDC [1]. Sent així, la bateria del CAT08e està separada en cinc segments de 19s3p amb una energia i un voltatge de 5.47MJ i 79.8VDC respectivament.

Dintre de cada segment o *stack*, la connexió tant de la sèrie com del paral·lel, es fa per pressió. Els borns de les cel·les són dues làmines d'alumini de 0.2 mm de gruix [5] com es pot apreciar a la *Figura 4.4*.

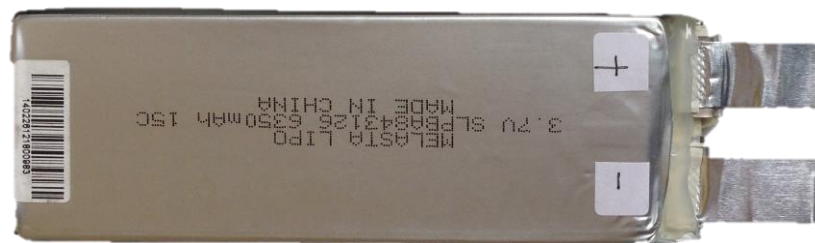


Figura 4.4 Cel·la Melasta SLPBA843126

Aquests, travessen una placa i són doblegats de manera que s'uneixen de tres en tres per formar el paral·lel. Un cop format el paral·lel, una altra placa amb bus-bars de coure de 2 mm de gruix encastades 1 mm, es cargola a la primera placa de manera que al cargolar-les la connexió queda fixada. Aquestes *bus-bars* de coure, estan situades de tal manera que el pol negatiu de cada conjunt de tres cel·les, està en la mateixa *bus-bar* que el positiu del següent grup de tres que ha de connectar. Així és com *bus-bar* rere *bus-bar* es forma la connexió del 19 sèrie de cada *stack* (Figura 4.5).



Figura 4.5 Connexions de potència

Les cel·les estan disposades en dues fileres; una de 30 cel·les i una altra de 27. Això és així ja que s'aprofita l'espai lliure de la filera de 27 cel·les, per a allotjar-hi les barres prismàtiques d'alumini que permeten fixar l'*stack* a la caixa de la bateria.

Per sobre de les connexions de potència, habiten les connexions de sensat tant de temperatura com el de control. Pel que fa al primer, es realitza amb NTCs [3] directament en contacte amb la part superior de les bus-bars que contacten amb els borns negatius de les cel·les. Això és així degut a que aquest és el born que més s'escalfa en una cel·la de tipus LiPo [5]. La normativa obliga a monitoritzar la temperatura del 30% de les cel·les [1], és per això que només hi ha 6 NTCs repartides uniformement per cada *stack*. Aquesta distribució és aprovada pels jutges de la competició en el *ESF* (*Electrical Safety Form*). Document en el qual s'ha de descriure tots els components importants de la caixa de bateries per tal que la competició comprovi que és segura.

Les connexions de sensat de cada *stack* monitoritzen el voltatge de tots els grups paral·lel. Per fer-ho, un cable soldat a cada *bus-bar* porta la informació de voltatge a dues plaques bessones del *BMS* (*Battery Management System*) situades sobre la placa superior on estan fixades les *bus-bars*. El *BMS* és el sistema que s'encarrega d'analitzar l'estat de totes les cel·les de la bateria i monitoritzar-ne l'autonomia.

Per sobre el *BMS*, es troba la tapa de l'*stack*. Una làmina de policarbonat d'un mil·límetre de gruix.

A la següent *Figura* es poden observar tots aquests aspectes.

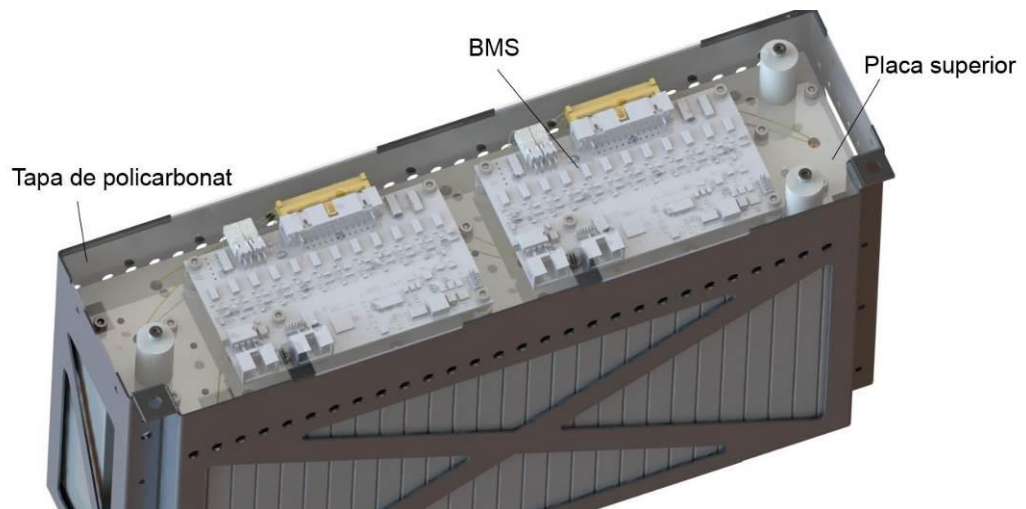


Figura 4.6 Stack

4.2. Descripció de la refrigeració de la bateria del CAT08e

La refrigeració de la bateria del CAT08e es fa amb aire a través d'uns ventiladors extractors situats a la part posterior de la caixa. L'aire entra pels forats laterals i és aspirat a través de la bateria pels ventiladors (*Figura 4.7*). Aquests forats són de 4 mm de diàmetre. El diàmetre d'aquests està limitat per la normativa ja que amb una vara de 6 mm de diàmetre i 120 mm de llargària, no s'ha de poder tocar cap element amb voltatge de la bateria [1]. A la *Figura 4.8* es pot veure el disseny de la paret lateral de la bateria.



Figura 4.7 Refrigeració de la bateria del CAT08e

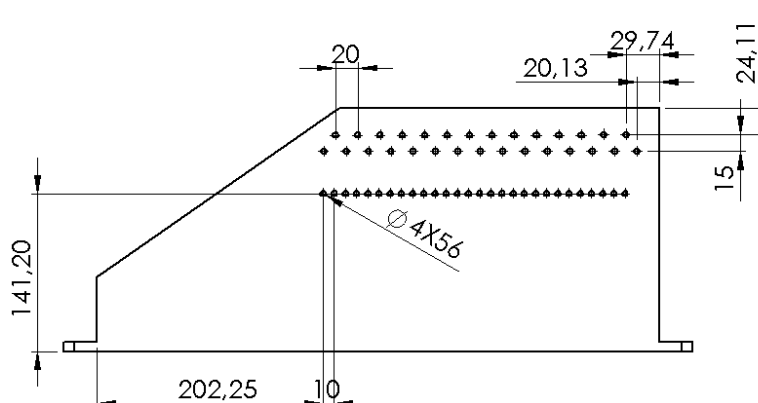


Figura 4.8 Plànol disposició forats CAT08e

La línia inferior de forats correspon a l'alçada de les connexions de les cel·les, on l'aire és forçat a passar a través dels espais entre les bus-bars i extret per 13 ventiladors OD2510 [2]. La separació entre les dues plaques que asseguren la connexió és de tan sols 2mm degut a la part de la bus-bar que sobresurt i el gruix dels tres borns de cada paral·lel (Figura 4.9).

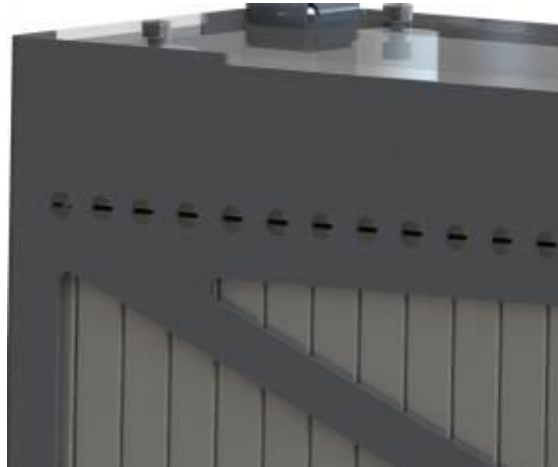


Figura 4.9 Representació visual de la línia inferior de forats

Pel que fa a les dues línies superiors de forats, estaven dissenyades per a generar una circulació d'aire lliure per damunt de les tapes dels *stacks* mitjançant cinc ventiladors OD4020 [4]. En afegit, es van foradar tant la xapa superior de la connexió de potència, com la tapa dels *stacks*, de manera que la línia de ventiladors superior també succionés aire dels forats inferiors. A la *Figura 4.10* es poden veure de manera esquemàtica les possibles línies de corrent de l'aire.

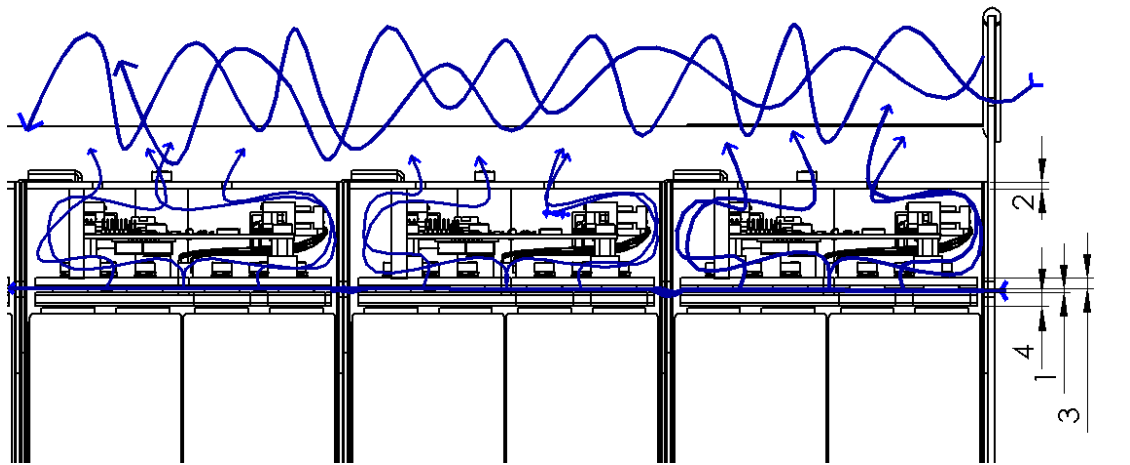


Figura 4.10 Esquema línies de corrent CAT08e

4.3. Anàlisi refrigeració CAT08e i possibles camins de millora

Durant el transcurs de la temporada 2014-2015, el CAT08e va realitzar nombroses proves de llarga distància de les quals s'han extret valuoses dades amb les quals es poden extreure conclusions.

En primer lloc, quan el monoplaça corria a ritme elevat, la bateria assolia els 65°C amb relativa facilitat. Això suposava un gran problema no només per les possibles penalitzacions, sinó perquè la integritat de les cel·les estava en risc ja que aquestes tenen una temperatura màxima de funcionament de 60°C [5].

A aquest aspecte s'hi va sumar que l'autonomia de la bateria era menor de la esperada atès que les cel·les que la formaven ja havien propulsat el CAT07e. Això va fer que el ritme del cotxe no pogués ser el desitjat perquè calia estalviar energia. Per aquest motiu el problema de temperatura no va ser tan limitant.

En una primera anàlisi es podria pensar que només era efecte de la refrigeració de la caixa de la bateria, però, el problema avarca més àmbits. Com a conseqüència que la bateria està allotjada a l'interior del monocasc, un habitacle tancat, la renovació d'aire, tot i existir gràcies a dos ventiladors extractors i una entrada d'aire superior, era insuficient. Aquesta temporada s'augmentarà el cabal d'aire extret pels ventiladors i es millorarà l'eficiència de la entrada d'aire. Això, però, queda fora de l'abast d'aquest projecte.

El que si que entra dintre l'abast d'aquest projecte és tota la refrigeració de la caixa. Aquesta, s'ha decidit seguir-la fent per aire. El cas ideal és emprar fluid dielèctric tot inundant la bateria amb aquest i fent-lo circular propulsat per una bomba centrífuga a través d'un circuit amb un bescanviador de calor (radiador) per refredar-lo. La normativa, però, permet tan sols refrigeració per aire o, en cas de ser líquida, per aigua. Davant la perillositat de la cohabitació de l'aigua i les cel·les, aquesta opció ha estat ràpidament descartada ja que una gota d'aigua en contacte amb dos borns de la bateria seria catastròfica tant per la bateria com pel pilot.

També es va pensar en fer un híbrid emprant tubs de calor (*Heat pipes*) (*Figura 4.11*). Els tubs de calor són normalment tubs cilíndrics d'alta conductivitat tèrmica emprats per a dissipar potència de llocs amb poc espai. El tub conté en el seu interior un líquid que pot canviar de fase entre evaporació i condensació al ser sotmès a una diferència de temperatura. De manera que es col·loca un extrem del tub en la font de calor i l'altre en un punt on es pugui eliminar la calor de manera més efectiva.

Amb aquest sistema, es podria haver solucionat el problema de com extreure l'energia calorífica d'un punt amb tan poc espai.

També tenien certs desavantatges, com per exemple l'augment de pes que aquests suposarien i el seu preu; ja que hagués calgut fer-los a mida. Finalment però, es van descartar pel simple fet que no hi havia espai material per a emplaçar-los de manera que un extrem estigués en contacte amb les connexions i l'altre a la part més alta de la bateria, on circula més aire.

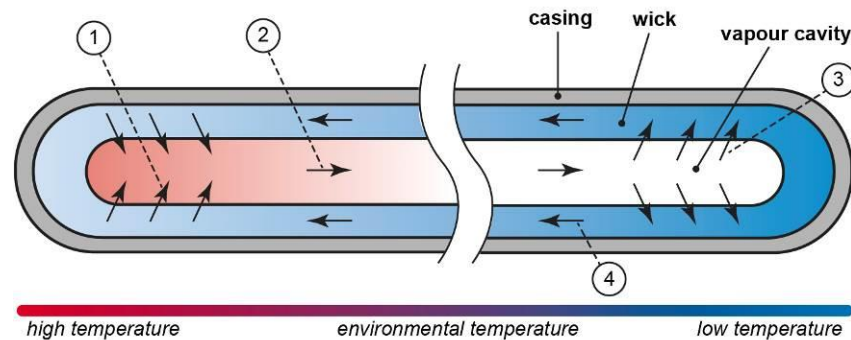


Figura 4.11 Funcionament d'un tub de calor [9]

Així doncs, un cop decidit el tipus de refrigeració, calia buscar els punts de millora d'aquesta respecte a la de la temporada anterior.

El primer aspecte important és trobar els components que generen calor i intentar reduir-ne la generació atès que la millor manera de disminuir la temperatura és reduir el problema de generació que en provoca l'augment.

Un altre aspecte fonamental és el cabal extret pels ventiladors. Si s'extreu més cabal, la velocitat de l'aire pel circuit serà superior i per tant també ho serà el seu coeficient de convecció. En afegit, també augmentarà el número de Reynolds. Això farà que augmenti la energia turbulenta i també augmentarà, en conseqüència, l'eficiència.

Això enllaça amb el darrer punt que s'estudiarà: la eficiència del circuit. Un circuit més eficient permetrà extreure més energia calorífica per unes mateixes condicions de contorn.

5. Reduir la generació de calor

Dintre la caixa hi ha tres elements que generen calor: les cel·les, les bus-bars i el contacte entre els borns de les cel·les i les bus-bars.

5.1. Cel·les

Les cel·les dissipen potència en forma de calor per efecte Joule (*Equació 5.1*).

$$P_{dis} = R_{int} \cdot I^2 \cdot N_{cel·les} \quad (\text{Equació 5.1})$$

On I és la intensitat de cada cel·la, R_{int} la seva resistència interna i $N_{cel·les}$ el número de cel·les de la bateria (285).

Pel que es refereix a la intensitat (I), s'ha decidit emprar la intensitat mitja quadràtica atès que a l'*equació 5.1* el terme de la intensitat està elevat al quadrat.

Per a poder quantificar aquesta intensitat, cal saber quina intensitat mitjana quadràtica passa per cada cel·la. Per a determinar-la, es va partir de les dades extretes del Treball de Final de Grau, *Caracterització i Simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student*, d'en Víctor Calvo Serra [7], membre de l'equip. En el seu projecte va modelar els elements del cotxe de manera que fos possible simular tant la prova de l'*Autocross* com la de l'*Endurance* tot extraient-ne valuoses dades com, per exemple, la intensitat extreta de la bateria a cada instant. Així, i per l'exposat en anteriors apartats, es va simular un *Endurance* al ritme màxim al qual el cotxe pot rodar (veure Apèndix 1 de l'Annex).

Amb aquestes dades, s'ha dividit per 3 (nombre del paral·lel de la bateria) la intensitat quadràtica mitjana extreta de la bateria, per tal d'obtenir la intensitat de cada cel·la.

El valor obtingut ha estat el que es pot observar a la *Taula 5.1*:

Intensitat Mitja Quadràtica en l' <i>Endurance</i>	18,9858 A
--	-----------

Taula 5.1 Intensitat mitja quadràtica en l'*Endurance*

El valor de la R_{int} , en canvi, és característic de cada model de cel·la. Els trets més característics d'una cel·la de tipus liti-polímer són la capacitat, la intensitat màxima de descàrrega i la resistència interna (R_{int}). Des del CAT07e es duu el model SLPBA843126 de Melasta [5]. Per aquesta temporada es va fer un nou estudi per intentar trobar una cel·la que tingués més capacitat per a poder mantenir un ritme més elevat durant l'*Endurance*. També es buscava que tingués una major intensitat màxima de descàrrega per tal de no maltractar-les tant durant l'*Acceleration*. En afegit, per a intentar solucionar el problema de temperatura també calia que el model tingués una menor R_{int} .

Aquests requeriments es van trobar en el model SLPBB042126 de Melasta [8].

A la següent *Taula* es poden veure ambdues comparades:

	SLPBA843126	SLPBB042126
Capacitat (mAh)	6350	6600
Intensitat màxima de descàrrega contínua (A)	95,25	99
Resistència interna (R_{int}) (mΩ)	<2	<1,5
Dimensions (llarg x ample x gruix) (mm)	127 x 42,7 x 10,5	127 x 42 x 10,7

Taula 5.2 Característiques principals dels dos models de cel·les

A simple comparació ocular, es veu la clara millora que aquest nou model aportaria. Més exhaustivament, i referint-se a la calor dissipada, la diferència entre un model i l'altre es pot veure en la *Taula* següent:

	SLPBA843126	SLPBB042126
Potència dissipada (W)	205,4625	154,0969

Taula 5.3 Potència teòrica dissipada per ambdós models

Amb aquests resultats es quantifica la millora en un 25%.

Tot i aquests resultats tan favorables aquesta millora no es va poder implantar per al CAT09e tot i que es segueix treballant en ella per a futurs monoplaces.

L'augment de 0,2 mm en la dimensió del gruix, que multiplicada per les 30 cel·les, suposava un augment en la longitud de la caixa de 6 mm, en va impossibilitar la implementació.

Tot i poder semblar una diferència molt petita enfront els 503 mm de longitud total de la caixa, el fet d'haver d'aprofitar el monocasc del CAT08e i, per tant, els punts de fixat de la caixa a aquest, feien fixa aquesta cota i per tant, en va impossibilitar el canvi.

Cal també remarcar que, quan les cel·les es carreguen, aquestes generen més calor atesa a la reacció química de la càrrega ja que segons el fabricant [5] és molt exotèrmica. Això, però, no afecta a aquest projecte, ja que la finalitat d'aquest, és reduir la temperatura de funcionament de la bateria per evitar problemes de sobreescalfament durant les curses.

5.2. Bus-bars

Pel que fa a les bus-bars, també generen calor per efecte Joule (Equació 5.2).

$$P_{dis} = R_{cond} \cdot I^2 \quad (\text{Equació 5.2})$$

En aquest cas, la intensitat (I) és la intensitat total que surt de la bateria durant l'*Endurance* (56,9575 A) atès que, per les bus-bars, hi circula tot l'amperatge. La resistència R_{cond} , és simplement la resistència elèctrica generada pel pas de corrent a través d'un conductor d'una determinada secció i llargada (Equació 5.3).

$$R_{cond} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S} \quad (\text{Equació 5.3})$$

On ρ_{Cu} és la resistivitat del material en Ω/m . En el nostre cas, les bus-bars són de coure que té una resistivitat mitja a 20°C de $1,71 \times 10^{-8} \Omega/m$. La seva temperatura de funcionament, però, no serà pas de 20°C. És per això que és necessari modificar l'equació 5.3 amb un coeficient corrector com es pot veure a continuació:

$$R_{cond} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T) \quad (\text{Equació 5.4})$$

Aquesta correcció depèn d'un paràmetre característic del material (α_{Cu}) i de la diferència de temperatura respecte els 20 °C al qual es vulgui avaluar l'expressió (ΔT). En aquest cas el valor d'alfa pel coure té un valor de $\alpha_{Cu} = 0.004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ i la diferència de temperatura entre els 20 °C als que estan tabulades les resistivitats i els 50 °C del punt de treball de les bus-bars és igual a $\Delta T = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Pel que fa a la longitud (l), es refereix a la longitud total de coure en metres. Aquesta longitud és de 982,4 mm per cada *stack* que multiplicada pels cinc té com a resultat la longitud total $l = 4,912 \text{ m}$.

Per acabar, la secció, correspon a la secció transversal al pas de corrent en m^2 . Les bus-bars del CAT08e tenien una secció de 10 mm d'ample per 2 mm de gruix. Per aquest any, també s'ha volgut reduir la calor generada a les bus-bars i s'ha decidit que la millor manera era variant-ne la secció. L'altre paràmetre que es podria modificar seria la resistivitat tot canviant el material. Però això, suposaria emprar materials com la plata ($1,58 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m}$) o fins i tot el grafè ($1,00 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m}$), fet que encariria massa el projecte i ha estat per tant descartat.

Així doncs, s'han estudiat possibles canvis de secció. S'ha decidit mantenir fixa a 2 mm la dimensió del gruix atès que aquest és un gruix comercial i el següent és de 5 mm i l'augment de pes seria massa elevat. Com a conseqüència d'aquesta decisió, només restava a modificar l'amplada del coure. S'han estudiat tres possibles amplades (10, 12 i 15 mm) amb les conseqüències més importants: el pes, les pèrdues i la reducció de volum d'aire. Aquesta última és molt important atès que l'espai que hi ha entre les bus-bars, és espai per on es força l'aire per a extreure calor de la bateria. Així doncs, un augment de secció, tindria com a conseqüència una reducció elevada del volum d'aire que provocaria un augment de les pèrdues de càrrega i, per tant, una disminució de l'efectivitat de la refrigeració.

Els valors de les tres amplades s'han escollit pels següents motius: La primera és l'amplada actual de les bus-bars al CAT08e, el valor de la tercera coincideix amb l'amplada dels borns del model de cel·la seleccionat [5], i el segon s'ha triat així per tal de tenir un valor mitjà. Tots aquests resultats es troben a la següent *Taula*.

	10 mm (Actual)	12 mm	15 mm
Pes (g)	880	1056	1320
R_{cond} (m Ω)	4,704	3,920	3,136
Pèrdues (W)	15,26	12,72	10,17
Volum d'aire (cm ³)	158,46	148,64	133,90

Taula 5.4 Conseqüències de la variació d'amplada a les bus-bars

D'aquests resultats s'extreu clarament que la millora és prou substancial fins al punt que de 10 a 15 mil·límetres, hi ha una disminució del 33% en la calor que dissipen tot i que també hi ha un augment de pes de més del 50% i una reducció d'espai d'aire d'un 16%.

Per altra banda, també és cert que 15 W són molt pocs enfront els 200 W de les cel·les, de manera que potser aquest augment de pes no estaria justificat. Però, l'augment d'amplada, també afavoreix en la millora del contacte entre la connexió de cel·la i bus-bar. Aquest contacte s'estudiarà amb més profunditat al següent punt, però pel simple fet d'augmentar la amplada de les bus-bars, s'augmenta la superfície de contacte entre born i coure. En conseqüència, es redueixen les probabilitats de connexions amb pocs punts de contacte que deriven en altes dissipacions d'energia en forma de calor.

En base a tots aquests factors s'ha decidit que la millor opció era escollir bus-bars de 12 mm d'amplada ja que, tot i ser la opció de 15 mm la que més reduïa la dissipació de calor, augmentar 500 g el pes no era complementari amb la política d'austeritat de massa que té qualsevol equip del món del *motorsport*. Amb 12 mm d'amplada, ja s'obtenia una reducció de la calor de més d'un 15%, sense penalitzar tant en pes ni en reducció de volum d'aire.

5.3. Contacte entre cel·les i bus-bars (Experiment)

Un punt crític és la manera d'assegurar el bon contacte entre els borns de les cel·les i les bus-bars. Com ja ha estat explicat anteriorment, aquest contacte s'assegura per mitjà de pressió. Les làmines dels borns travessen la placa inferior i es dobleguen sobre aquesta. La placa on les bus-bars hi estan encolades, es colla a la placa inferior mitjançant cargols. Aquest borns que estan fets d'alumini de 0,2 mm de gruix es dobleguen uns sobre els altres de manera que queda un gruix irregular al llarg de la bus-bar. A la *Figura* següent es pot veure una representació d'aquest succés; tot i que a la realitat els borns no queden perfectament plans, el que provoca mals contactes.

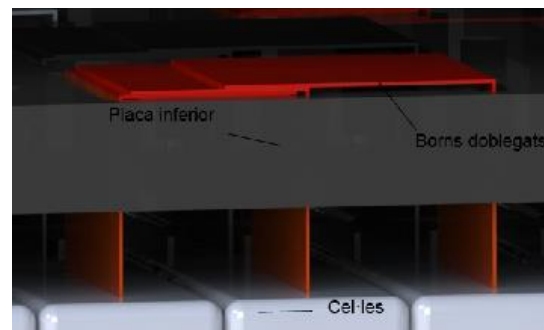


Figura 5.1 Detall del contacte entre bus-bar i borns

Com es pot observar a la *Figura 5.1*, la longitud dels borns de les tres cel·les de cada paral·lel cal que sigui diferent. Tant el de l'esquerra com el central, es dobleguen un sobre l'altre i per tant són de la mateixa longitud (10 mm). El de la dreta, però, cal que sigui més llarg, atès que ha de tenir una longitud igual a l'espessor d'una cel·la més un tram (15 mm), per tal de fer contacte sobre els dos borns ja doblegats. Originalment, en les cel·les de les que es disposava els borns eren tots de 15 mm.

A principis de la temporada del CAT08e, es va decidir no tallar aquests borns per fer el contacte. Això va ser degut a la recomanació del fabricant de no tallar-los ja que poden malmetre la cel·la. En comptes d'això, es va decidir doblegar sobre si mateixos la part sobrant. Amb aquesta acció encara es va agreujar molt més la diferenciació de gruixos com es pot veure en la següent *Figura*.

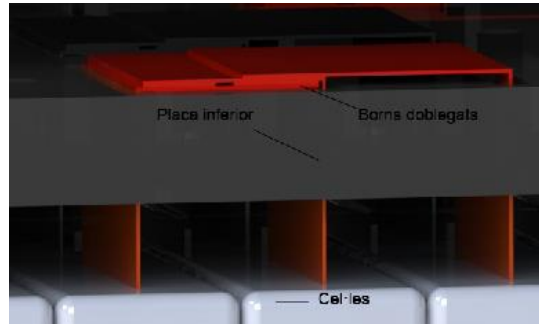


Figura 5.2 Detall del contacte entre bus-bar i borns doblegats

Amb aquesta configuració es van fer proves de càrrega i descàrrega de la bateria per tal de testejar-la abans de fer-la servir al cotxe. En aquestes proves, la temperatura va pujar ràpidament a prop de 120°C fins al punt que una cel·la va arribar a encendre's. Gràcies a que tot el material de la caixa és ignífug i auto-extingible, només va ser una flamarada verda durant un curt instant. En el posterior anàlisi dels fets es va concloure que la càrrega electrònica que havíem emprat no era l'adequada atès que tenia unes pèrdues que suposaven 15 A. En afegit segons es va poder observar un cop desmuntat l'*stack* (Figura 5.3 i Figura 5.4), el foc s'havia produït en una de les connexions. En una deliberació comuna es va decidir de tallar els borns a la longitud necessària per tal de millorar aquest contacte.



Figura 5.3 Conseqüències incident descàrrega



Figura 5.4 Conseqüències incident descàrrega

Aquesta modificació va suposar una gran millora per a la segona part de la temporada del CAT08e fent que en cap moment se superessin els 70°C.

Per la temporada del CAT09e, s'ha decidit estudiar en profunditat aquesta qüestió per tal de reduir el mal contacte el màxim possible. Per fer-ho, s'ha pensat en emprar alguna pasta tèrmica conductora tant de la calor com de l'electricitat per aplicar-la entre borns i bus-bars per tal de millorar el contacte.

Enfront la dificultat de modelar un mal contacte per simular-lo, s'ha dissenyat un muntatge experimental per tal de realitzar dos blocs de proves tant quantitatives com qualitatives.

En la primera d'elles s'ha volgut millorar aquest contacte mitjançant la distribució dels cargols.

En l'altre gran bloc s'ha volgut estudiar si es podria millorar el contacte aplicant pastes conductores tant de la calor com de l'electricitat. Així, s'han assajat diferents pastes termoconductores aplicades entre borns i bus-bar per tal de decidir tant qualitativa com quantitativament què donava els millors resultats.

5.3.1. Disseny del muntatge

Per a fer les proves calia realitzar-les amb un model el més semblant possible a la realitat. Atès que no es disposava de cel·les il·limitades, es va decidir no fer l'assaig amb un *stack* amb totes les cel·les. Sinó realitzar-lo amb una configuració 2s3p en una placa de connexions modificada.

La idea era realitzar la connexió de potència de la mateixa manera que al cotxe, però emprant només 6 cel·les i una bus-bar d'estudi. Així, s'aprofitaria un dels borns de la placa de connexió de potència de l'*stack* en el que s'hi connectarien els 3 borns positius del primer grup de cel·les. Els altres 3 borns, els negatius, serien doblegats sota la bus-bar d'estudi que, a la vegada, també fixaria els 3 borns positius de l'altre sèrie, realitzant així el dos sèrie. Per últim, els 3 borns negatius d'aquest darrer grup de paral·lel, es doblegarien sota una bus-bar modificada que permetria treure el born negatiu del 2s3p per a connectar-lo a la càrrega electrònica i així poder fer les proves (*Figura 5.5*).

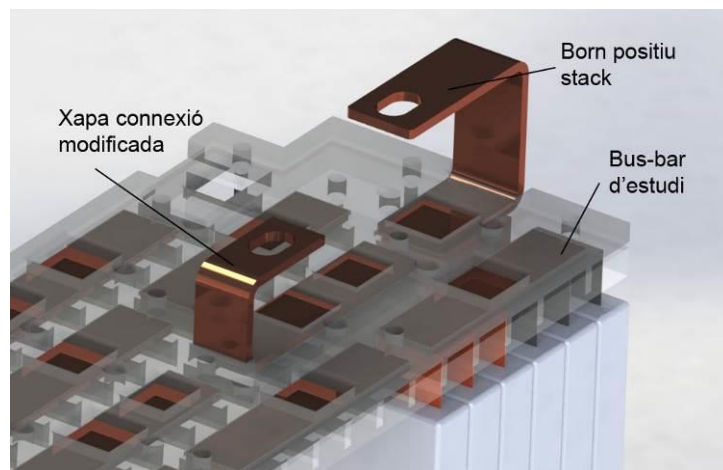


Figura 5.5 Configuració 2s3p experiment

S'ha utilitzat una càrrega electrònica d'hp model 6050A que té un voltatge màxim de 60 VDC i una intensitat màxima de 50 A (*Figura 5.6*).



Figura 5.6 Càrrega electrònica hp 6050A

Per al sensat de temperatures s'han emprat dos aparells de manera complementària. El primer, un piròmetre digital (*Figura 5.7*), el segon, una placa Arduino Mega 2560 (*Figura 5.8*). Aquest darrer, s'ha utilitzat tant per mesurar temperatures com per mesurar voltatges.



Figura 5.7 Piròmetre digital

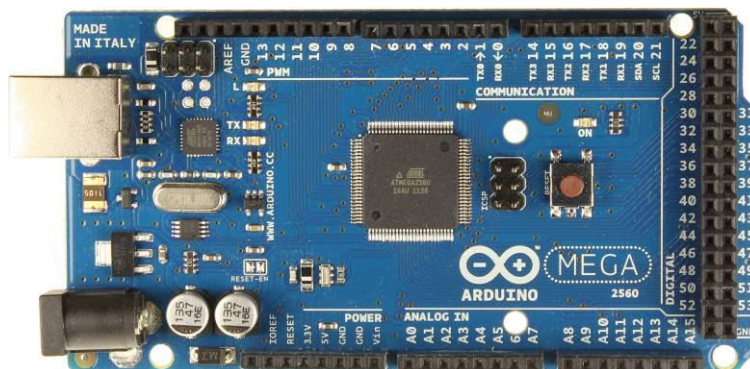


Figura 5.8 Arduino Mega 2560

Per a mesurar els voltatges dels dos grups sèrie i del conjunt, ha calgut mesurar tres punts del circuit. Els pols positiu i negatiu de l'*stack*, i la bus-bar d'estudi, ja que és el punt elèctric de la unió de la sèrie. Donat que calia mesurar punts a diferents voltatges i ja que l'Arduino no pot fer lectures superiors als 5 VDC, ha calgut afegir-li una placa amb un divisor resistiu amb resistències d'1 k Ω per tal de reduir el voltatge a la meitat.

Per a mesurar les temperatures, s'han fet servir 7 NTC's connectades a la mateixa placa amb també un divisor resistiu previ a l'Arduino per tal de limitar-ne el corrent.

Les NTC's s'han distribuït de la següent manera: 2 s'han col·locat als cossos de les cel·les dels extrems, per tal de controlar la temperatura en aquesta zona. Ja que sempre s'ha cregut que el bescanvi de temperatura només es produïa als borns atès que el sobre de la cel·la es creia que actuava d'aïllant tèrmic. 2 NTC's més s'han col·locat als terminals negatius de cada grup paral·lel, ja que segons la organització de la competició i el fabricant, el born negatiu de la cel·la és el que més s'escalfa. Finalment s'han col·locat 3 NTC's a les 3 bus-bars per on passarà intensitat. Tot i que, veritablement, les lectures de temperatura de les dues bus-bars on s'hi connecten els terminals de la càrrega no seran realistes ja que hi influirà el contacte entre la bus-bar i el terminal de volandera. Tot i això s'ha cregut oportú monitoritzar-les per a poder tenir un control total sobre totes les parts (*Figura 5.9*).

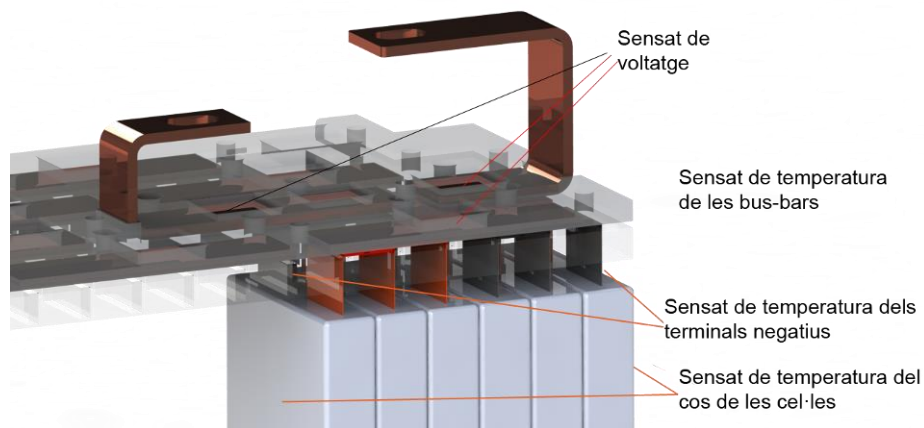


Figura 5.9 Esquema de sensats de l'experiment

Tots aquests valors són processats per l'Arduino i guardats en una fulla d'Excel. Aquest processament de dades es realitza gràcies a en Manel Duran, membre de l'equip, que ha desenvolupat el programa i una petita interfície gràfica amb Simulink per tal de poder veure en temps real tots els valors (*Figura 5.10*).

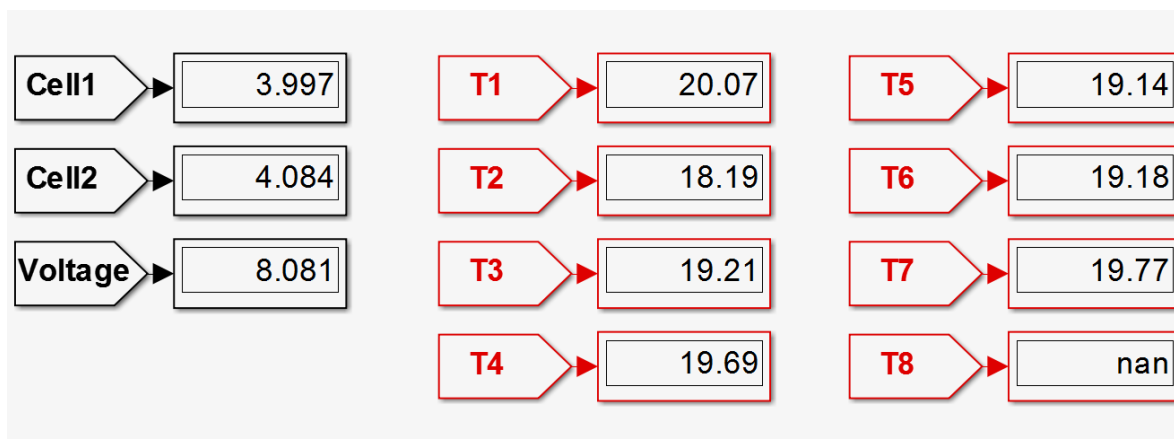


Figura 5.10

Interfície gràfica del sensat dels experiments

Com es pot veure a la *Figura* anterior, també s'ha afegit un sensor extra (T8) per si es volia obtenir una lectura extra.

5.3.2. Construcció de muntatge

Primer de tot s'ha modificat la xapa de connexions per tal de poder-hi encabir la bus-bar modificada. Aquesta modificació era molt senzilla i només calia fer un forat rectangular com es pot veure a la *Figura 5.11*.

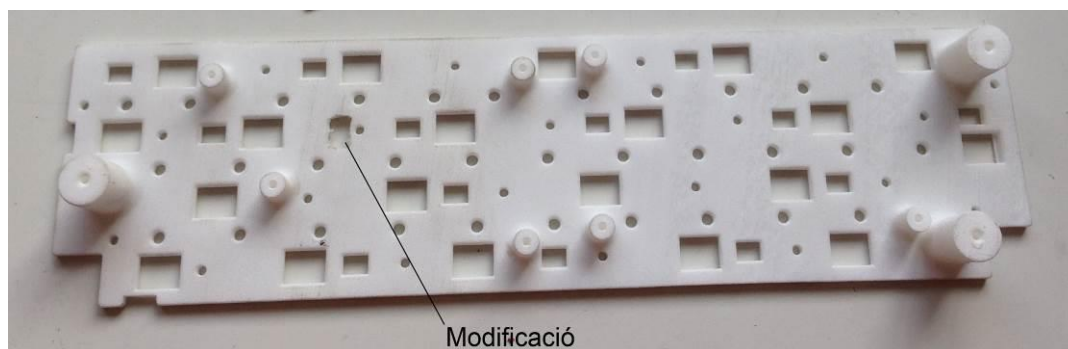


Figura 5.11

Modificació de la placa de connexions

Seguidament, s'han soldat els cables de mesura de voltatge a les tres bus-bars per on hi circularà corrent i s'ha procedit a enganxar totes les bus-bars de coure a la placa amb Loctite 401 (*Figura 5.12*).

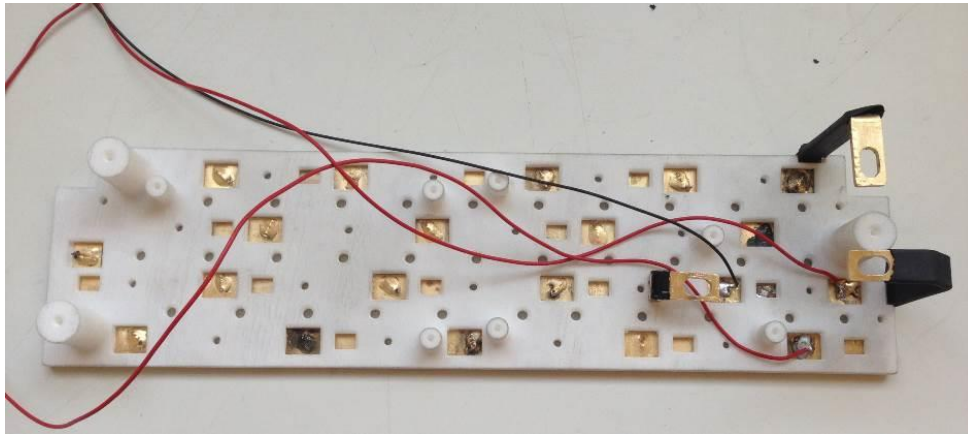


Figura 5.12

Placa de connexions per als experiments

A continuació, s'han doblgat els borns de les cel·les a través de la placa inferior de l'*stack* i s'han situat les NTC's als punts anteriorment citats (*Figura 5.13*) i finalment s'ha cargolat la primera placa sobre la segona per tal de fer la connexió i s'ha introduït dintre l'*stack* tot emplenant els espais buits amb escuma (*Figura 5.14*).

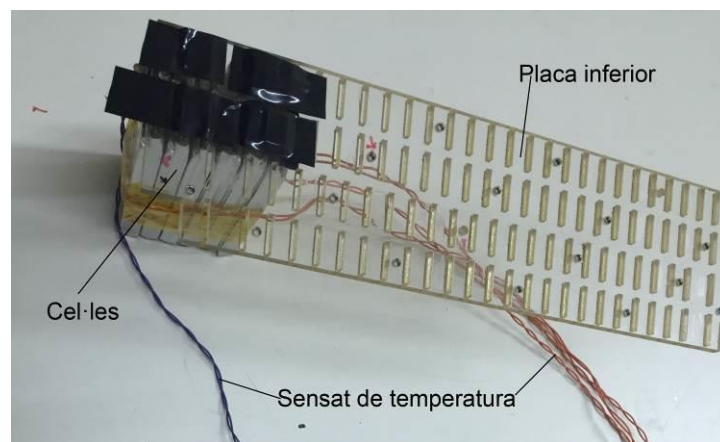


Figura 5.13

Part inferior del muntatge de l'experiment

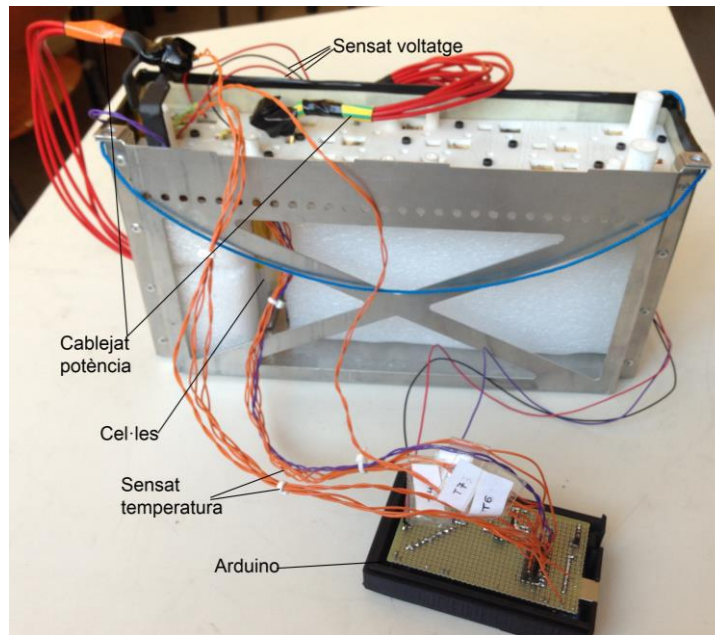


Figura 5.14

Muntatge complet de l'experiment

5.3.3. Experiment de la distribució de cargols

El primer bloc de proves es basa en la comparació del connexionat del CAT08e amb el connexionat prototip del CA09e.

En aquest prototip s'hi veu representat, per exemple, l'augment de secció de les bus-bars. L'altre gran canvi respecte el CAT08e, ha estat la distribució de cargols i com es col·len aquests. En el CAT08e, hi havia un cargol a cada extrem de les bus-bars amb algunes excepcions on només hi havia cargol en un extrem. A la *Figura* següent es pot observar la distribució del CAT08e i, en vermell, marcats els extrems de les bus-bars on no hi havia cargol.

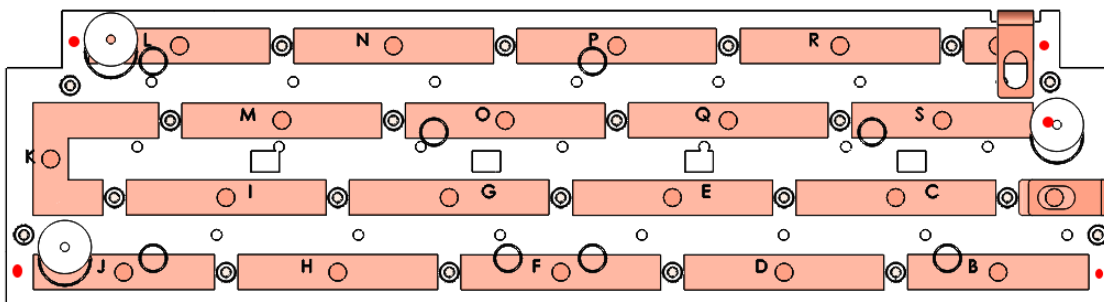


Figura 5.15

Distribució de cargols del CAT08e

Així doncs s'ha desplaçat alguns i se n'ha afegit d'altres per tal d'arribar a una configuració on hi haguessin cargols a cada extrem de cada bus-bar (*Figura 5.19*).

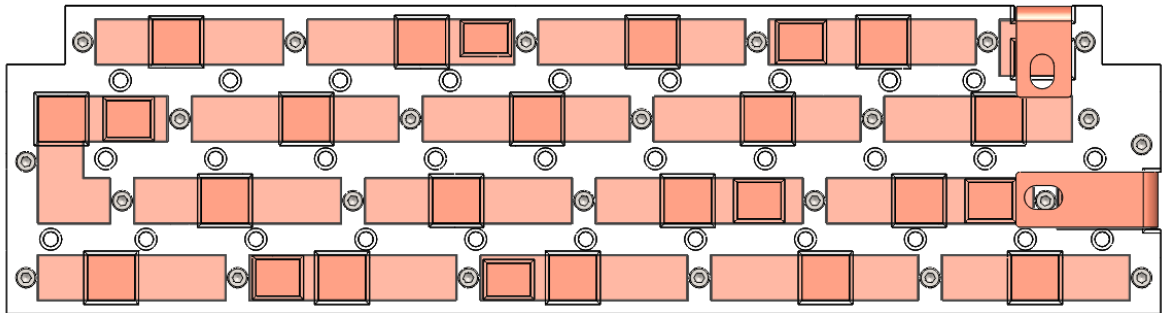


Figura 5.16

Distribució de cargols del CAT09e

Cal posar especial atenció en que en la zona de l'experiment hi ha dos cargols que en el disseny anterior no hi eren.

Un cop dissenyada la placa, s'ha construït i adaptat per tal de poder experimentar amb els dos muntatges.

Per a poder determinar amb claredat quins experiments es realitzaven i els seus protocols, s'han creat unes plantilles per tal de poder tenir-ho tot en consideració (veure Apèndix 2 de l'Annex). Així, tots els experiments partien de les cel·les en un estat de càrrega de 4,10 VDC.

Els experiments constaven d'una part de *steps* i una part de descàrrega contínua. La idea de tenir dos tipus diferents de descàrregues és poder observar els *voltage drops* en la primera i analitzar les temperatures en la segona.

En la primera fase es descàrrega a diferents intensitats durant el mateix període de temps (10s) (*steps*). Així els experiments segueixen la següent seqüència d'intensitats: 1-0-5-0-10-0-20-0-30-0.

El *voltage drop* és el fenomen que es dona quan es varia la intensitat de descàrrega en una cel·la. Quan es produeix aquesta variació d'intensitat, la cel·la experimenta una reducció del seu potencial que és proporcional a la resistència equivalent del circuit que veu la cel·la. Aquesta resistència és la suma de la de la pròpia cel·la, la de les cel·les de la altra sèrie, la dels cables, la interna de la càrrega electrònica i la resistència de contacte entre borns i bus-bars. És per això que monitoritzant i comparant aquests *voltage drops* es pot estimar l'efecte del mal contacte.

A la següent *Figura* es poden veure tots els valors dels sensors durant els experiments. Els valors en colors més vius pertanyen a l'experiment amb la configuració del CAT08e i els colors més apagats al prototip del CAT09e.

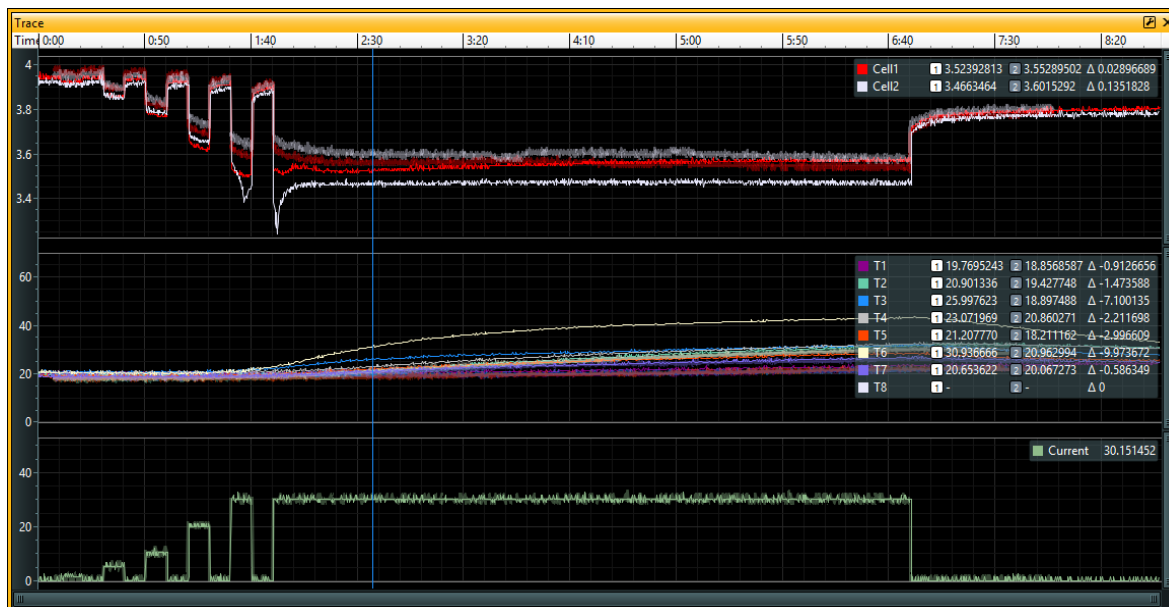


Figura 5.17

Resultats experiment distribució de cargols

La zona superior de la imatge correspon al sensat del voltatge, la intermèdia a les temperatures i la inferior a la intensitat de descàrrega.

A la zona superior es poden apreciar clarament els anteriorment esmentats *voltage drops*. També és clarament visible la millora en el comportament amb la nova placa superior. Durant els *steps* tots els *voltage drop* han estat menors amb la placa prototip del CAT09e, i durant la fase constant de descàrrega les temperatures màximes també. A la *Taula* següent es poden veure comparats els valors de temperatura dels dos experiments.

Temperatures (°C)	Placa CAT08e	Placa CAT09e
Cos sèrie 1	23,16	20,44
Cos sèrie 2	21,9	21,29
Born negatiu sèrie 1	31,17	21,55
Born negatiu sèrie 2	32,47	30,19
Bus-bar negativa	27,54	21,77
Bus-bar d'estudi	42,20	29,65
Bus-bar positiva modificada	25,96	25,46

Taula 5.5 Resultats temperatura experiment distribució cargols

La temperatura més elevada és la de la bus-bar d'estudi. Aquest fet no ha de sorprendre ja que és aquesta bus-bar la única del muntatge que té dos contactes de borns contra bus-bar, pel que es genera el doble de calor per mal contacte que a les altres. Això fa pensar que l'efecte del mal contacte té una gran rellevància de com a mínim el mateix ordre de magnitud que el de la potència dissipada a les cel·les.

La conclusió de comparar ambdós resultats és senzilla: millorar la distribució dels cargols redueix la temperatura de la bus-bar i el *voltage drop* el que vol dir que millora el contacte ja que millora la pressió.

5.3.4. Experiment de les pastes tèrmiques

Pel que fa al segon bloc de proves, s'han aconseguit dos models de pastes tèrmiques per a fer les proves: *Silver Ice 710* de l'empresa *Timtronics* i *TcZn-60* de *Poweralia*. S'han escollit aquests dos models atès que el primer és dels que millors característiques tèrmiques i elèctriques té del mercat. El segon, en canvi, tot i no tenir tan bon rendiment teòric, és d'un sponsor de l'equip i seria a cost zero. Ambdues són conductores tèrmiques i elèctriques i a la següent *Taula* es resumeixen les seves característiques més importants:

	Silver Ice 710 [10]	Poweralia TcZn-60 [11]
Conductivitat Tèrmica (W/mK)	7	4
Resistència Tèrmica ($\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)	0.005	-
Resistència Volumètrica ($\Omega\cdot\text{cm}$)	<0.01	-
Temperatura de punt de gota ($^{\circ}\text{C}$)	200	110
Preu (€/gram)	1.40	0.25 (Gratis)

Taula 5.6 Característiques de les dues pastes tèrmiques

Com es veu a la *Taula* anterior, la primera pasta presenta millors característiques que la segona, tot i que té un preu molt més elevat. De fet, de la segona, no s'han pogut obtenir més dades tècniques. Observant aquestes diferències, es faran experiments per tal de comprovar si existeix diferència a la pràctica entre una, altra i un experiment de control sense pasta tèrmica.

Per a poder determinar amb claredat quins experiments es realitzaven i els seus protocols, s'han creat unes plantilles per tal de poder tenir-ho tot en consideració (veure Apèndix 2 de l'Annex).

Abans de posar en contacte les pastes tèrmiques amb les cel·les, s'ha decidit fer un experiment preliminar on s'avaluaria la fluència de les pastes a altes temperatures. Això és molt important ja que si a altes temperatures les pastes esdevenen més fluides, i varien la seva posició, al ésser aquestes conductores de l'electricitat, podrien provocar un curtcircuit catastròfic.

El procediment de l'experiment es basa en aplicar pasta tèrmica al centre d'una bus-bar subjectada en alt amb una pinça i aplicar-hi calor per sota fins als $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. I mantenir la temperatura en aquest valor durant 5 minuts. Per a comprovar la temperatura s'ha posat una NTC just al costat de la pasta tèrmica (*Figura 5.18*) i connectada al port T8. Degut a la alta dissipació que tenia la bus-bar, va ser necessari aplicar la calor amb un decapador.

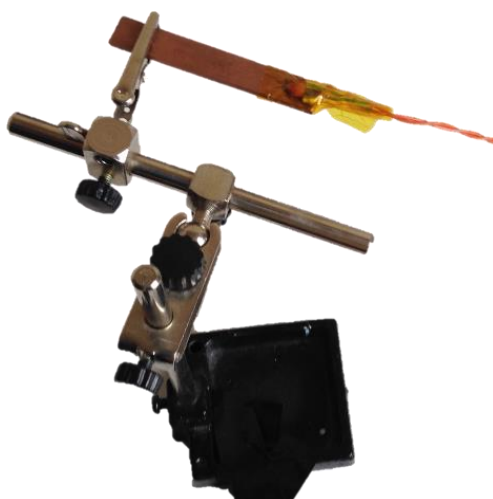


Figura 5.18

Muntatge proves preliminars

La primera avaluació de comportament s'ha fet amb la pasta tèrmica *TCZn-060* de *Poweralia* (Figura 5.19).



Figura 5.19

Muntatge prova preliminar pasta *TcZn-060*

Cinc minuts després s'ha girat lateralment 90° la bus-bar de manera que s'ha deixat perpendicular a la taula i s'ha esperat un minut per comprovar que aquesta no es movia (Figura 5.20).

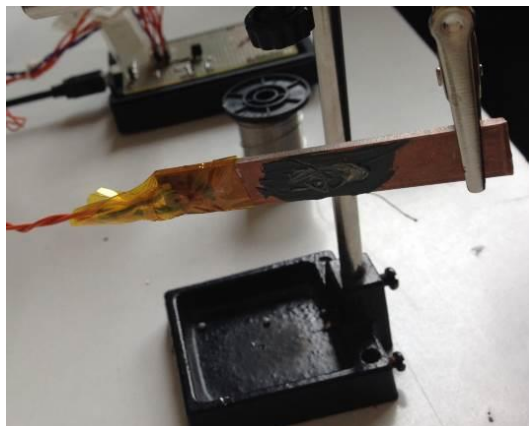


Figura 5.20 Resultats prova preliminar pasta *TcZn-060*

Després de 5 minuts a 100°C, la pasta termo-conductora *TcZn-060*, no va presentar moviment al girar-la.

També es va fer la mateixa prova preliminar amb la pasta *Silver Ice 710* de *Timtronics* (Figura 5.21), els resultats de la qual es poden veure a la Figura 5.22.



Figura 5.21 Muntatge prova preliminar pasta *Silver Ice 710*



Figura 5.22 Resultats prova preliminar pasta *Silver Ice 710*

Després de 5 minuts a 100°C, la pasta termo-conductora *Silver-Ice 710*, no va presentar moviment al girar-la.

Un cop determinat que els dos compostos eren estables a altes temperatures, es va procedir amb els experiments amb el muntatge.

S'ha decidit fixar un guió per tots els experiments per tal de fixar el màxim nombre de variables. Així, tots els experiments partirien de les cel·les en un estat de càrrega de 4,10 VDC.

S'han fet tres experiments. El primer, un experiment de control sense pasta tèrmica per a trobar uns valors de referència. El segon, aplicant la pasta termo-conductora *TcZn-060* i el tercer aplicant la pasta termo-conductora *Silver Ice 710*.

Pel que fa al guió dels experiments, aquest ha estat el mateix que a l'experiment anterior ja que es creu una molt bona manera d'avaluar la incidència en el comportament del mal contacte.

A continuació es poden veure els valors de voltatge i temperatura dels dos primers experiments:

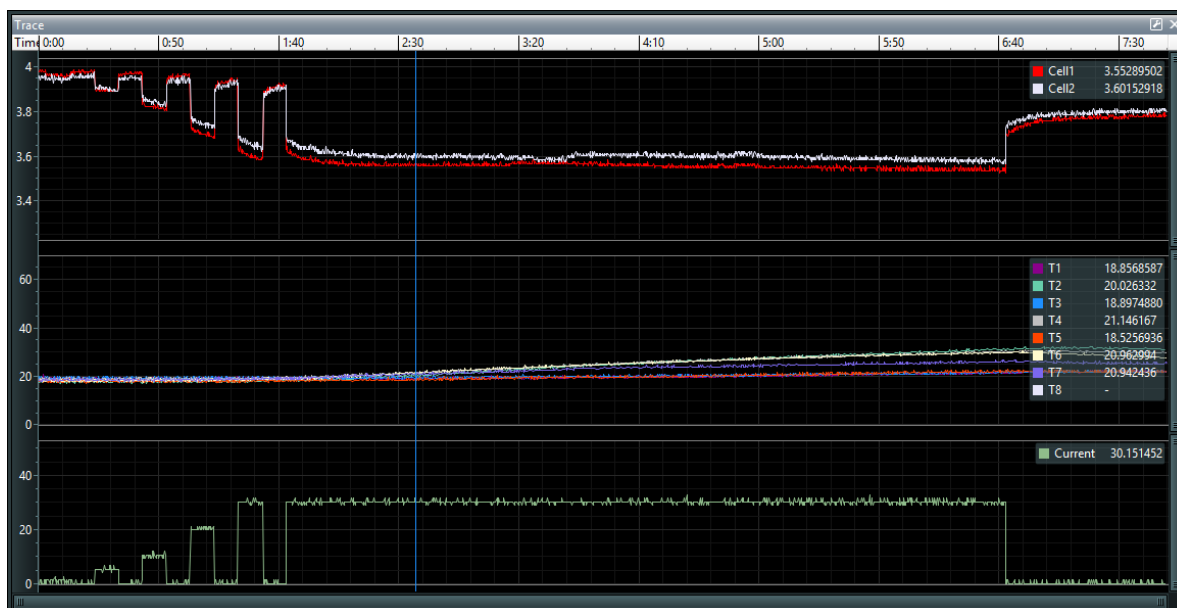


Figura 5.23

Resultats experiment de control



Figura 5.24

Resultats experiment *TcZn-060*

L'experiment amb la pasta tèrmica *TcZn-060* no es va poder completar del tot ja que els *voltage drop* eren molt pronunciats i la integritat de la cel·la es podia veure compromesa. En qualsevol cas els resultats són molt pitjors que en l'experiment de control tot i haver-se repetit en diferents ocasions, tot havent desmuntat i tornat a muntar tot el dispositiu per tal d'assegurar-se que no era provocat per una variable no controlada.

Això és creu és degut al següent: El mal contacte és degut a que no totes les zones dels borns d'alumini ($3,78 \cdot 10^7$ S/m) contacten amb el coure ($5,96 \cdot 10^7$ S/m). És a dir, hi ha zones on entre l'alumini i el coure hi ha aire. Aquest aire té una conductivitat elèctrica molt més baixa que aquests dos materials ($3 \cdot 10^{-15}$ S/m), per tant, sembla bona idea omplir-los amb pasta termo-conductora amb una conductivitat elèctrica d'entre $1 \cdot 10^{-2}$ i $1 \cdot 10^{-4}$ S/m. Ara bé, com que la pressió que s'aplica no és prou alta, no és possible evitar que també hi hagi pasta termo-conductora en els contactes directes anteriors d'alumini i coure. Aquest fenomen es veu a la *Figura 5.25* on es veu la dispersió de la pasta un cop desmuntat l'*stack*. Es pot veure clarament com tot i omplir els espais d'aire, també es queda una petita capa entre els borns i la bus-bar empitjorant el contacte.



Figura 5.25

Difusió de la pasta termo-conductora

Aquest fenomen, però, no s'ha produït amb la darrera pasta tèrmica. A continuació es pot observar el seu comportament durant l'experiment.

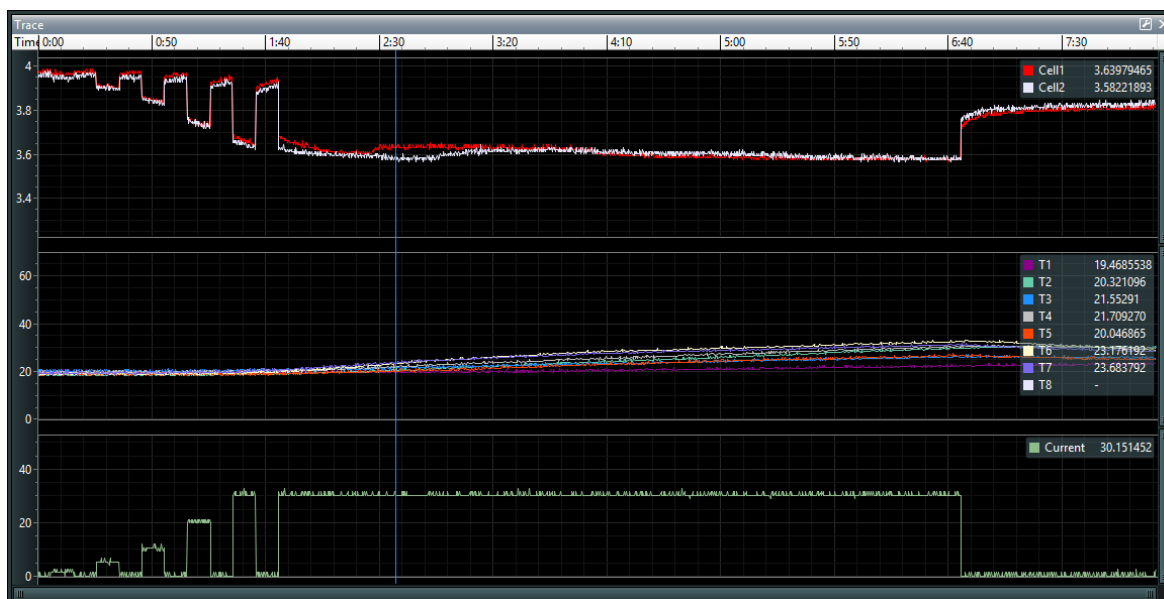


Figura 5.26

Resultats experiment *Silver-Ice 710*

Aquests resultats presenten un comportament molt semblant a la descàrrega de control el que ha fet creure que aquesta pasta, tenia molt millor rendiment. Això es pot justificar en certa manera per la diferència de preus que tenen les dues com ja s'ha comparat anteriorment.

A la *Figura 5.27* es poden veure comparats els dos experiments. Amb els colors més vius es representa la descàrrega de control i en els més apagats la descàrrega amb pasta termo-conductora *Silver Ice 710*.



Figura 5.27 Resultats comparatius experiment de control i Silver-Ice 710

Amb els valors comparats, es veu un comportament pràcticament calcat. Cal doncs referir-nos als valors màxims de temperatura de la *Taula 5.7*.

Temperatures (°C)	Control	<i>Silver Ice 710</i>
Cos sèrie 1	20,44	22,07
Cos sèrie 2	22,29	20,01
Born negatiu sèrie 1	21,55	26,00
Born negatiu sèrie 2	30,19	30,41
Bus-bar negativa	21,77	25,93
Bus-bar d'estudi	29,65	32,17
Bus-bar positiva modificada	25,46	30,07

Taula 5.7 Resultats comparatius de control i *Silver Ice 710*

Es pot veure clarament com els valors de temperatura empitjoren al aplicar la pasta termo-conductora. Tot i aquesta pasta presentar millor conductivitat que la anterior, el guany obtingut segueix sense compensar el que es perd afegint aquest petit gruix de pasta entre el contacte net anterior.

Així doncs s'ha decidit no aplicar cap pasta termo-conductora als contactes.

6. Extreure un major cabal d'aire

A part de generar menys calor, una altra via per a reduir la temperatura de treball de la bateria és augmentar el cabal d'aire que s'extreu de dintre la caixa. La manera més senzilla de fer això és augmentar la potència dels ventiladors. Si bé el cabal d'aire depèn de la pèrdua de càrrega, cosa que s'explicarà en detall en el següent punt d'aquest projecte, augmentant la potència dels ventiladors ja s'assegura extreure un major cabal d'aire de la caixa.

Augmentar la potència consumida dels ventiladors, però, té una conseqüència dràstica en l'autonomia de la bateria de control. La bateria de control és l'element que alimenta tota l'electrònica del monoplaça. Tant la del CAT08e com la del CAT09e, és una bateria de base ió de liti amb una configuració 7s4p. Més concretament, es ió de liti ferro fosfat (LiFePO₄). Aquesta, té un voltatge màxim de 25,9 VDC, un voltatge nominal de 22,4 VDC i una capacitat de 10 Ah i una intensitat màxima de descàrrega contínua de 15 A. Els ventiladors necessiten un voltatge constant de 12 VDC els quals els subministra un convertidor DC-DC. Per tal de no sobrecarregar-lo, s'ha optat per a escollir una configuració de ventiladors amb un consum energètic el més semblant possible a l'any anterior.

La refrigeració de la bateria del CAT08e, com ja s'ha exposat anteriorment, constava de 5 ventiladors OD4020 i 13 OD2510 (*Figura 6.1*).



Figura 6.1 Disposició de ventiladors CAT08e

Com es pot observar, als *stacks* centrals hi ha situats tres ventiladors OD2510 mentre que als dos dels extrems tan sols n'hi ha dos. Per damunt d'aquesta línia estan els cinc ventiladors OD4020. Aquesta configuració era diferent atès que els primers tenen un gruix de 10 mm i els segons de 20 mm. En el CAT08e es va decidir emprar ventiladors de 10 mm a la línia inferior per la proximitat de la bateria amb el motor (*Figura 6.2*).

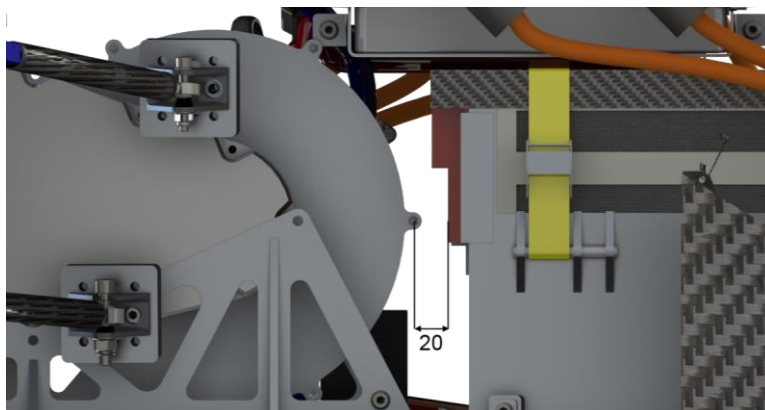


Figura 6.2 Proximitat de la bateria del CAT08e al motor

Tot i que com es pot apreciar a la *Figura 6.2*, existeix l'espai necessari per a implementar una opció amb tots els ventiladors de 20 mm de gruix. Però, atès que la bateria és un element mòbil ja que s'ha d'extreure del cotxe cada vegada que s'ha de carregar perquè així ho mana la normativa, es va decidir deixar més marge de maniobra per a l'hora de posicionar-la evitar danyar el motor o la caixa.

De cada sèrie de ventiladors d'*Orion Fans*, en afegit, existeixen diferents models que extreuen més o menys aire a costa de consumir més intensitat segons la potència del petit motor d'aquests. A la següent *Taula* es pot observar la referència completa amb el consum unitari i total així com el cabal extret màxim d'ambdós models i la potència total consumida tenint en compte que es connecten a 12 VDC.

	OD4020-12LB	OD2510-HB	Consum total (W)
Intensitat unitària (A)	0,07	0,09	18,24
Cabal màxim (CFM)	7	2,7	Intensitat total (A)
Intensitat total (A)	0,35	1,17	1,52
Cabal màxim total (CFM)	35	35,1	

Taula 6.1 Consum refrigeració de la bateria del CAT08e

Per a la nova refrigeració, s'ha decidit fer servir 15 ventiladors OD4020-12HB les característiques d'aquesta elecció es poden veure a la *Taula 6.2*.

	OD4020-12HB	Consum total (W)
Intensitat unitària (A)	0,10	18
Cabal màxim (CFM)	9	
Intensitat total (A)	1,50	
Cabal màxim total (CFM)	135	

Taula 6.2 Consum refrigeració de la bateria del CAT09e

Aquesta decisió s'ha pres després de l'experiència recopilada durant tota la temporada on finalment la caixa de la bateria era extreta i posada a lloc sense excessius problemes. Així, s'ha optat per apostar pels ventiladors OD4020-12HB, els més potents de la sèrie, ja que al ésser aquests de major diàmetre que els OD2510, en calien menys per a omplir la línia inferior (13 OD2510 per 8 OD4020). Amb aquest canvi, es reduïa considerablement el consum energètic per part dels ventiladors. Ja que la bateria de control o permetia, s'ha intentat aproximar-se als valors de consum de l'any anterior per així extreure més aire. Així doncs, s'han afegit dos ventiladors a la filera superior de manera que en el CAT09e són 7 en comptes dels 5 del CAT08e (*Figura 6.3*).

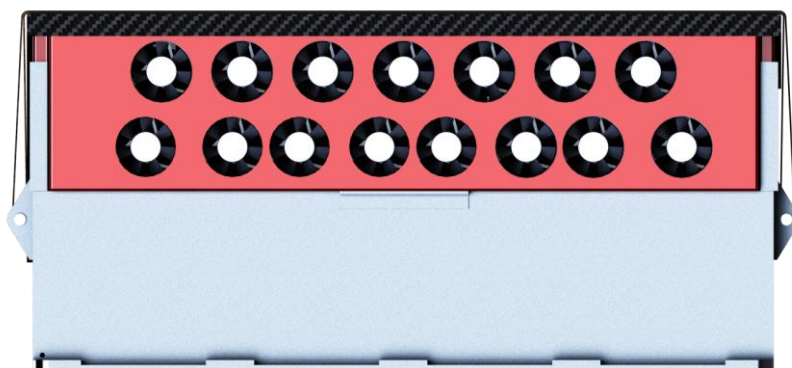


Figura 6.3 Disposició de ventiladors CAT09e

Així la part posterior de la bateria ja queda fixada i, amb aquests canvis, s'obté un valor de consum energètic molt semblant i un augment del cabal màxim extret del 380%. Números molt prometedors que calia gestionar bé per tal de fer un circuit eficient; punt que s'ha estudiat a continuació.

7. Circulació més eficient

De cara a reduir la temperatura de funcionament de la bateria, l'altre punt molt important és tenir una circulació d'aire eficient.

Per a dissenyar un circuit d'aire eficient a l'hora d'extreure calor dels focus calents, i alhora eficient en termes de pèrdua de càrrega s'ha cregut oportú fer simulacions amb programari de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

7.1. Bases teòriques i CFD

Una equació en derivades parcials (EDP) és una equació les incògnites de les quals, són funcions de diverses variables amb la peculiaritat que no només apareixen les funcions, sinó també les seves derivades. És a dir, una funció del tipus $u(x_1, \dots, x_n)$ té una equació del tipus:

$$f(x_{1,\dots,n}, u, \frac{\partial u}{\partial x_{1,\dots,n}}, \frac{\partial u^2}{\partial x_{1,\dots,n} \partial x_{1,\dots,n}}, \frac{\partial u^3}{\partial x_{1,\dots,n} \partial x_{1,\dots,n} \partial x_{1,\dots,n}}, \dots) = 0 \quad (\text{Equació 7.1})$$

Les EDP es poden classificar segons el grau. Les més comunes són les de primer i les de segon grau.

Les equacions amb derivades parcials de primer grau són aquelles que només contenen termes de les primeres derivades de la funció incògnita.

Les equacions de segon ordre, en canvi, depenen també de les segones derivades de la funció incògnita. Les EDP de segon grau tenen la forma que apareix a l'*Equació 7.2*.

$$f(x_{1,\dots,n}, u, \frac{\partial u}{\partial x_{1,\dots,n}}, \frac{\partial u^2}{\partial x_{1,\dots,n} \partial x_{1,\dots,n}}) = 0 \quad (\text{Equació 7.2})$$

Aquestes, es poden separar en tres tipus segons el seu determinant: Parabòliques, el·líptiques i hiperbòliques.

Les dues primeres (D'Alembert, Fourier) es poden solucionar amb els mètodes numèrics tradicionals. Les hiperbòliques, però, sent lineals o no, presenten certes dificultats numèriques conegudes (Hoffman, 2001) [13] que reclamen l'ús de mètodes numèrics específics.

En el cas del transport de calor, aquesta no linealitat ve donada per dos factors: d'una banda la dependència de la temperatura de les diferents propietats físiques dels materials; siguin aquests sòlids o fluids. En segon lloc, pel terme convectiu existent en l'equació de transport (terme responsable de la hiperbolicitat).

De la necessitat de poder resoldre aquest tipus de sistemes, va néixer el *Computational Fluids Dynamics* (CFD) (Runchal 2009) [14]. El CFD és una branca de la mecànica de fluids que a través de mètodes numèrics soluciona problemes que inclouen fluxos de fluids.

Les bases fonamentals de pràcticament tot el CFD són les equacions de Navier-Stokes per a flux incompressible. Aquestes apliquen el Teorema del Transport de Reynolds, la conservació de la massa, de la quantitat de moviment i de l'energia i es poden veure a continuació en forma diferencial per a un vector de velocitat $\vec{u} = (x, y, z)$:

$$\nabla \vec{u} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \cdot \Delta \vec{u} + g \quad (\text{Equació 7.3})$$

On P és la pressió (Pa), u és la velocitat (m/s), ρ és la densitat (Kg/m^3), ν és la viscositat cinemàtica (m^2/s) i g és la gravetat (m/s^2).

Aquestes equacions són un sistema de 4 equacions amb 4 incògnites (x,y,z,t).

La relació amb la temperatura del problema aquí analitzat obliga a complementar el sistema d'equacions de Navier-Stokes amb l'equació de conservació de la calor. Aquesta és la que té en compte la transferència de calor i es pot veure a l'Equació 7.4.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T)}_{\text{Derivada local}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho C_p T \vec{u})}_{\text{Derivada convectiva}} = \underbrace{\nabla \cdot [\alpha \nabla (C_p T)]}_{\text{Difusió}} + \underbrace{\nabla \cdot (\vec{\tau} \otimes \vec{u})}_{\text{Disipació viscosa}} \quad (\text{Equació 7.4})$$

On C_p és la calor específica ($\text{J/Kg}\cdot\text{K}$), α la difusivitat tèrmica del material i T la temperatura en Kelvin.

El tensor de tensions $\bar{\tau}$ es defineix per a fluids newtonians com:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (\text{Equació 7.5})$$

Per tant, el sistema d'equacions ampliat per a tenir en compte els efectes tèrmics passa a ser de 5 equacions i 5 incògnites. Moltes vegades se suposa que el rang de temperatures a modelar permet considerar les propietats físiques com aproximadament constants. Això és el que representaria el sistema d'equacions descrit anteriorment, que simplificat quedaria:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \cdot \Delta \vec{u} + \vec{g} \\ \frac{\partial}{\partial t} (C_p T) + \nabla \cdot (C_p T \vec{u}) = \nabla \cdot [k \nabla (C_p T)] + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\bar{\tau} \otimes \vec{u}) \end{array} \right. \quad (\text{Equació 7.6})$$

Es pot veure com l'acoblament entre temperatura i hidrodinàmica és només a través d'un terme font en l'equació de la calor per dissipació viscosa (conversió d'energia mecànica a calor). Si es pretén fer un sistema d'equacions més realista s'ha d'incloure la dependència de les propietats físiques en la temperatura ($\rho \equiv \rho(T), \mu \equiv \mu(T)$), al no poder realitzar simplifications, el sistema d'equacions resultant seria:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \rho \vec{u} = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu \nabla \vec{u}] + \vec{g} \rho \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{u}) = \nabla \cdot [\alpha \nabla (C_p T)] + \nabla \cdot (\bar{\tau} \otimes \vec{u}) \end{array} \right. \quad (\text{Equació 7.7})$$

Tal com s'ha dit anteriorment la no linealitat rau en la dependència de ν, ρ tant en T com en el terme convectiu $(\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u}$. Per tant, sempre que no estigui completament justificat, es tracta de treballar amb el sistema simplificat (Equació 7.6).

D'altra banda, en ambdós sistemes, apareix el conegut problema de l'acoblament pressió-velocitat, ja que la incògnita P no disposa d'una equació de conservació pròpia (Nikrityuk, 2011) [15]. Això és una de les raons principals perquè el CFD requereix algorismes numèrics particulars, adaptats a aquesta singularitat.

7.1.1. Del continu al discret

Per a obtenir un resultat exacte en qualsevol problema, caldria resoldre aquestes equacions en tots els infinits punts de l'espai d'estudi. Ja que això no és possible, es fan servir mètodes numèrics per tal de discretitzar el problema partint d'un mallat.

Existeixen dues maneres fonamentals de mallar. De manera estructurada i de manera no estructurada. La primera té molts avantatges en termes de memòria ja que no cal guardar una taula de connectivitats per a saber quins elements hi ha al voltant. La segona, en canvi, té l'avantatge que és més senzilla de realitzar.

Existeixen diferents maneres de com abordar un problema discretitzat.

Una d'elles és el mètode de diferències finites (Hoffman, 2001) [13]. En ell, els únics valors que es tenen en compte per al càlcul, són els valors puntuals de cada element. Així no es té en compte el que passa dintre de la cel·la i es suposa constant.

Un altra mètode és el de volums finits (Leveque, 2002) [16]. En aquest, els valors per al càlcul es troben amitjanant els valors dels nodes l·lindars. Aquest mètode permet processar funcions amb discontinuïtats que el primer mètode és incapaç de fer per la seva pròpia definició.

Existeix un tercer mètode; el d'elements finits (Zienkiewicz, 1997) [17]. Aquest model té una gran teoria matemàtica al darrere i es basa en emprar interpoladors per a obtenir els valors dels elements. Això però, tot i entregar uns valors basats en una funció contínua no tenen perquè correspondre amb la forma de la funció real. En afegit, aquest model i més concretament el mètode de Galerkin, té moltes dificultats per a resoldre el terme convectiu de les equacions de Navier-Stokes.

7.1.2. Turbulència

En qualsevol cas, per als diferents mètodes numèrics existents, el que passa dintre dels elements però, no es calcula. El professor Kolmogorov va demostrar l'any 1941 [18] que els successos que passaven dintre d'aquests elements i no es tenien en compte, tenien una gran repercussió sobre el resultat final de tot el problema, independentment que aquest fos de grans o petites dimensions. Va ser en aquest punt quan es va començar a estudiar en profunditat la turbulència.

Existeixen tres grans maneres de tenir en compte la turbulència (Pope, 2000) [19]. La primera és l'anomenada DNS, i es tracta simplement de realitzar un mallat extremadament fi per tal de tenir en compte l'efecte de la turbulència a base d'augmentar el cost computacional. És per això, que no és una opció gaire estesa. Les altres dues maneres d'introduir l'efecte d'aquesta turbulència en les anteriors equacions sense un cost computacional desorbitat, és a través d'introduir un terme més a les equacions de Navier-Stokes; la variable ν_T (Viscositat Turbulenta) de manera que aquestes queden com segueix:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{u} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot \vec{u} &= -\frac{\nabla P}{\rho} + (\nu + \nu_T) \cdot \Delta \vec{u} + g\end{aligned}\quad (\text{Equació 7.8})$$

Aquesta variable ve definida per diferents equacions segons quin dels dos casos és. Si es tracta d'un model RANS, el càlcul d'aquesta viscositat turbulenta té molta importància ja que la malla només capta els successos a més gran escala i és en el càlcul de la viscositat turbulenta on apareix la influència dels de mitjana i petita escala.

Si el càlcul del terme de la viscositat turbulenta es fa segons el model de discretització LES (*Large Eddy Simulation*), el seu càlcul és molt més senzill ja que aquest model es basa en una malla més fina per tal de tenir en compte fins als successos de mitjana escala.

Aquests càlculs es poden fer segons diferents models que es poden classificar segons el nombre d'equacions que els governa. Els més importants són els de zero, una i dues equacions.

Els primers, calculen la viscositat turbulenta amb la dependència local dels elements del costat. És l'emprat pels models LES atès que no necessiten d'excessiva precisió ja que ho compensen amb una malla més densa. El model més típic és el de Smagorinsky (1963) [20], i a continuació es pot veure la seva equació característica, que a diferència de les que seguiran, és força simple.

A partir d'ara les equacions on apareguin subíndex adopten el conveni d'Einstein.

$$\nu_T = C_v \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \left[(G_{kk})^2 - G_{ij} G_{ji} \right]}{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}}\quad (\text{Equació 7.9})$$

On G_{ij} és:

$$G_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Equació 7.10})$$

La barra \bar{u}_i indica que el valor està amitjanat. En el cas del CFD, es refereix al valor obtingut a la malla, que donat que és més gran que les veritables escales de la turbulència es suposa com un amitjanat de tot el que succeeix a l'interior de l'element.

Els segons, ja són models més complexos i només es fan servir per a models RANS. El model més emprat és el de Spallart-Allmaras [21] (*Equació 7.11*). Un model d'una sola equació molt més complexa que en el cas anterior.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\nu_t \vec{u}) = C_{b1} [1 - f_{t2}] \nu_t S + \frac{1}{\sigma} \left\{ \nabla \cdot [(\nu + \nu_t) \nabla \nu_t] + C_{b2} |\nabla \nu_t|^2 \right\} - \dots \\ \dots \left[C_{\omega 1} f_{\omega} - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\nu_t}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta (\vec{u} \cdot \vec{u}) \end{aligned} \quad (\text{Equació 7.11})$$

Els tercers, de la mateixa manera que els primers, només es fan servir per a models RANS i són els més populars atès a la major precisió.

El model k-ε estàndard n'és un d'ells (*Equació 7.12*). És un model de turbulència molt comú i popular per la seva simplicitat i facilitat de convergència. Aquest model té dues variables de transport: l'energia cinètica turbulenta "k" (*Equació 7.13*), que determina l'energia de la turbulència, i la dissipació turbulenta "ε" (*Equació 7.14*), que representa el ratí de dissipació de la primera.

Aquest model té el seu punt fort, degut a la seva formulació, en situacions de corrent lliure, on no es tenen en compte els esforços tallants provocats per la viscositat i amb gradients de pressió relativament petits. En canvi, és poc precís i pot portar a resultats inexactes en fluxos amb molta separació de capa límit i gradients de pressió elevats.

$$\nu = C \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Equació 7.12})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Equació 7.13})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Equació 7.14})$$

Existeix una variant d'aquest primer; el model realitzable k- ε . Aquest, inclou una variació en la formulació de l'equació de la dissipació de l'energia " ε " (Equació 7.15), per tal de corregir els problemes en les proximitats d'una paret on, els esforços tallants, són de gran importància per la alta viscositat. En afegit, aquesta modificació també fa augmentar la facilitat de convergència dels càlculs.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (\text{Equació 7.15})$$

Un altre model de dues equacions de gran popularitat és el model k- ω (Equació 7.16). En aquest model les variables de transport són l'energia cinètica turbulenta " k " (Equació 7.17), i el ratí específic de dissipació de l'energia turbulenta " ω " (Equació 7.18). Aquest model, a diferència dels dos anteriors, obté molt bons resultats en situacions viscoses i de grans desprendiments. Això el fa ideal per a modelar la capa límit fluid-dinàmica. En canvi, en situacions de corrent lliure pot portar a inexactituds en els resultats.

$$\nu = C \frac{k}{\omega} \quad (\text{Equació 7.16})$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} k) = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \nabla k \right] \quad (\text{Equació 7.17})$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot \omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \nabla \omega \right] \quad (\text{Equació 7.18})$$

Existeix un model anomenat SST k- ω (*shear-stress transport*), que combina els models k- ϵ amb el k- ω . En les zones de corrent lliure s'aplica el primer, mentre que en la capa límit es fa servir el segon, obtenint així resultats molt bons en ambdues situacions.

Per a poder dur a terme la transició apareix una nova funció que val 0 en situacions llunyanes a les superfícies, convertint així el model en un k- ϵ , i val 1 en les proximitats d'aquestes, convertint-lo en un k- ω (Equacions 7.19 i 7.20).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}k) = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \nabla k \right] \quad (\text{Equació 7.19})$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot \omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (\text{Equació 7.20})$$

Per acabar amb les equacions de turbulència, resta comentar l'equació de l'energia. És la que té en compte la transferència de calor i per a un flux turbulent, és com es pot veure a l'Equació 7.21. Pel que fa a la transferència de calor a la part sòlida, es pot aplicar la mateixa equació tot simplificant els termes que no hi intervenen fins a tenir la equació de transferència de la calor en un sòlid (Equació 7.22).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\alpha + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla (C_p T) \right] + \rho \varepsilon \quad (\text{Equació 7.21})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \nabla \cdot \left[\left(\alpha + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla (C_p T) \right] \quad (\text{Equació 7.22})$$

Cal dir que en el terme $\nabla \cdot \left[\left(\alpha + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla (C_p T) \right]$, la influència de la $\frac{\mu_t}{\sigma_k}$ és d'ordres de magnitud superior al de la difusivitat tèrmica del fluid o del sòlid (α).

7.2. Descripció del model emprat

Existeixen molts programes de CFD. Per a realitzar les simulacions s'ha optat pel Flow Simulation del SolidWorks. També s'ha estudiat emprar el programari lliure OpenFoam. El fet de ser lliure i la seva versatilitat eren punts a favor claus però l'inconvenient de la gran dificultat d'importar la geometria i fer-li el mallat va decantar la balança cap al primer.

La decisió està basada en dos factors molt favorables. El primer és la facilitat que comporta treballar amb un CFD d'un programa CAD i és la facilitat d'importar la geometria. Això no només proporciona comoditat, sinó que permet assegurar que quan s'arriba a la etapa del mallat, aquest disposarà de totes les dades exactes necessàries per a obtenir-lo.

El mallat, precisament, és un altre dels punts a favor d'aquest programari. El SolidWorks presenta un mallat cartesià estructurat en cubs (*Structural cartesian immersed-body mesh*). Es basa en un mallat cúbic inicial que conté volums de control sòlids, fluids, i parcials. Els parcials, són aquells cubs que presenten part sòlida i part fluïda. Aquests es divideixen en 8 cubs més petits fins arribar al nivell determinat com a màxim refinament (*Figura 7.1*). Cal precisar que la diferència del nivell de refinament entre cel·les limítrofes no pot ser major a 1.

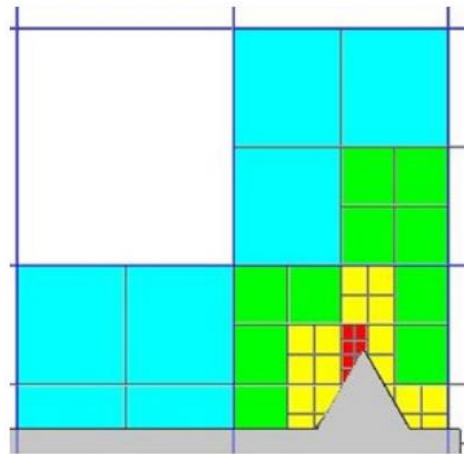


Figura 7.1 Mallat del SolidWorks després del refinament [22]

Un altre punt molt positiu del que disposa aquest mallador és la total llibertat dels elements per adoptar les formes geomètriques de les superfícies limítrofes.

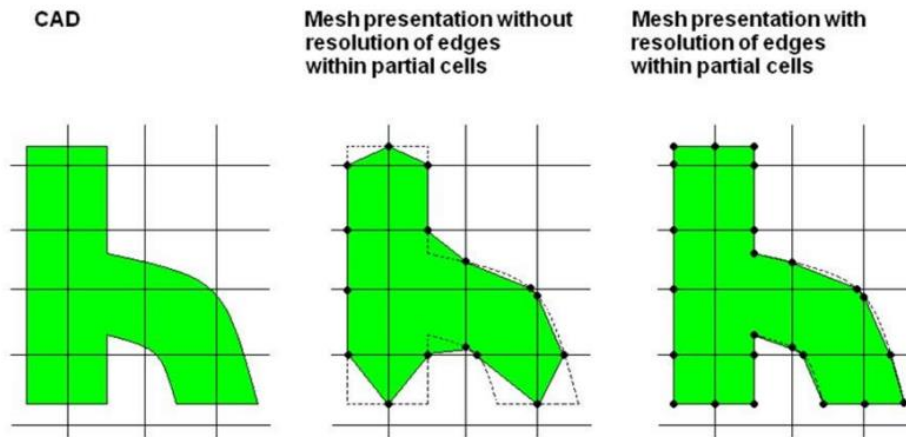


Figura 7.2 Diferència entre mallat comú i el del SolidWorks [22]

Normalment, en un mallat, la geometria d'una superfície es deforma de tal manera que els punts que la limiten queden als contorns de l'element, aquesta tècnica s'anomena "*body fitted*" (Ferziger and Peric, 2012) [23]. En SolidWorks, en canvi, el mallat és capaç de resoldre en cel·les parcials la geometria per tal d'adaptar-se molt millor a la superfície. Aquesta tècnica s'anomena "*immersed boundary*" (Mittal and Laccarino, 2005) [24], però SolidWorks implementa una versió especial que integra interseccions complexes. A la Figura 7.2 es pot veure la diferència entre la segona i tercera imatges; SolidWorks empra la tercera. Aquest fet permet tenir una major resolució de malla sense penalitzar en el cost computacional.

El punt més feble d'aquest programari és el model de turbulència. Aquest és fixat i és un $k-\epsilon$, que si bé és molt robust no és el més adient en situacions de proximitat de les parets com serà aquest cas. Més concretament es basa en les equacions de Lam i Benhost (1981) per l'energia cinemàtica turbulenta " k " (Equació 7.23) i dissipació turbulenta " ϵ " (Equació 7.24).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t P_b - \rho \epsilon \quad (\text{Equació 7.23})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_b) - f_2 C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Equació 7.24})$$

Un últim inconvenient és el fet que aquest model inclou una funció d'amortiment de la turbulència quan aquesta s'acosta a la paret i precisa del coeficient de convecció entre la superfície i el fluid per tal de poder calcular-la. Això porta a inexactituds en els resultats, però, en el cas de velocitats baixes i força constants com és el cas de la simulació de la bateria, es pot aproximar un valor de coeficient de convecció aproximat per valors tabulats.

Un cop valorats els avantatges i els inconvenients s'ha cregut que aquest darrer inconvenient no era motiu suficient com per a renunciar a tots els punts positius que té el programari. Així doncs, és el que s'emprarà per a fer les simulacions si bé és cert que els resultats numèrics hauran de ser agafats amb pinces ja que el model de turbulència no serà l'adequat. En canvi, serà molt vàlid per a dur a terme valoracions comparatives.

7.3. Simulacions

Com s'ha exposat anteriorment, les simulacions estan destinades a augmentar la eficiència del flux d'aire a l'interior de la caixa de la bateria per tal de millorar l'extracció de calor. Aquesta millora, s'ha abordat des de tres vessants: la primera, ha estat redissenyar el circuit conceptualment amb les conclusions extretes del CAT08e. La segona ha estat reduir la pèrdua de càrrega. I, per últim, augmentar la difusió turbulenta per tal de fer més eficient la transferència de calor sòlid-fluid alhora que s'ha intentat minimitzar la possible aparició de bypassos. S'entén per bypass, l'efecte pel qual s'aspira major quantitat d'aire de les entrades més properes als ventiladors. Aquest fenomen es produeix atès que aquelles línies de corrent, al realitzar un trajecte menor, presenten menor pèrdua de càrrega que les que provenen d'entrades més llunyanes. Aquest efecte és molt perjudicial ja que aquest flux d'aire, s'extreu quant encara no s'ha escalfat i alhora impossibilita que s'extregui flux d'aire que sí que ha estat correctament escalfat.

Primer de tot, era necessària una geometria per tal de simular-la. Atès que la bateria té una geometria molt complexa que suposaria un cost computacional desorbitat, s'ha decidit simplificar-la i prescindir de certs elements com tota la part davantera de control, així com del cablejat. També s'ha decidit simplificar les cel·les ja que aquestes només bescanvien calor pels borns i, per tant, la zona del seu cos no pren part en les simulacions. A les següents figures es pot apreciar la diferència entre la caixa real (esquerra) i la caixa simplificada per a simular (dreta) (*Figura 7.3*). I la diferència entre un *stack* real (esquerra) i un de simplificat (dreta) (*Figura 7.4*).

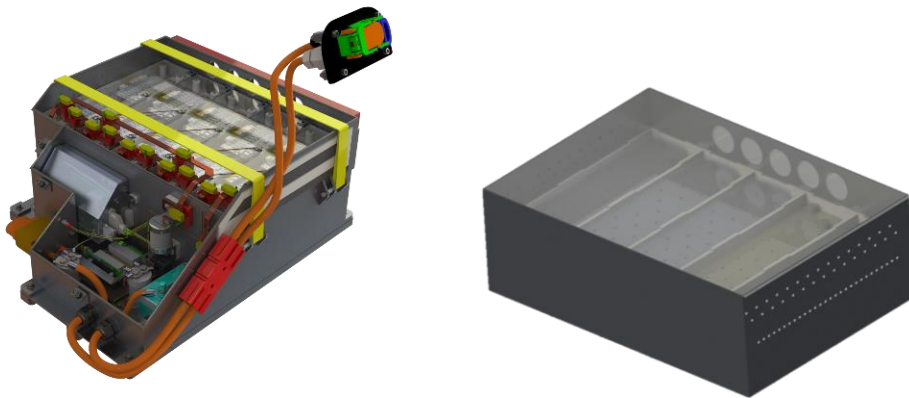


Figura 7.3 Diferència entre caixa real i simplificació per a simular

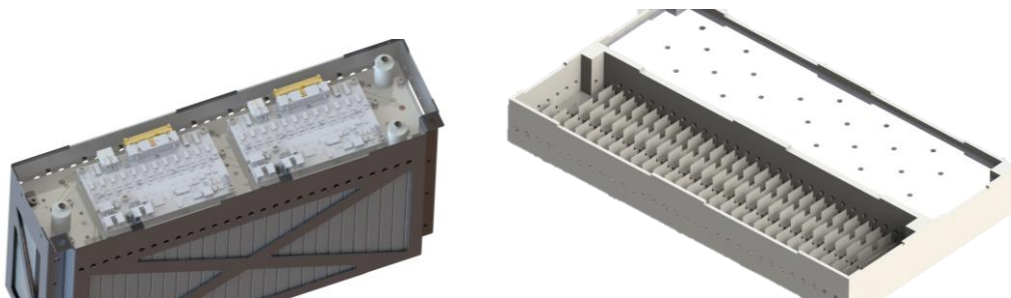


Figura 7.4 Diferència entre *stack* real i simplificació per a simular

Seguidament, calia definir les condicions de contorn. Aquestes són de vital importància en el cas del CFD ja que de la seva precisió en depèn la dels resultats. S'han aplicat dos tipus de condicions de contorn: les tèrmiques i les del fluid.

Les primeres són les que fixen la generació de calor. Aquesta, segons s'ha comentat amb anterioritat, es genera a les cel·les, a les bus-bars i al contacte entre unes i altres. La generació de les dues primeres no és cap problema i ja s'ha calculat en apartats anteriors d'aquest projecte (*Taula 7.1*).

	Cel·les	Bus-bars
Potència dissipada (W)	205,46	12,72

Taula 7.1 Recull de potències dissipades a cel·les i bus-bars

Una vegada quantificats aquests dos valors calia decidir on i com aplicar-los. Pel que fa a les cel·les, s'ha decidit aplicar la calor als borns de les cel·les ja que com ja s'intuïa i s'ha demostrat als experiments, és on es produeix el bescanvi de calor (*Figura 7.5*). El cas de les bus-bars, era més senzill ja que la generació es produeix a tot el volum d'aquesta per la conducció de l'electricitat (*Figura 7.6*).

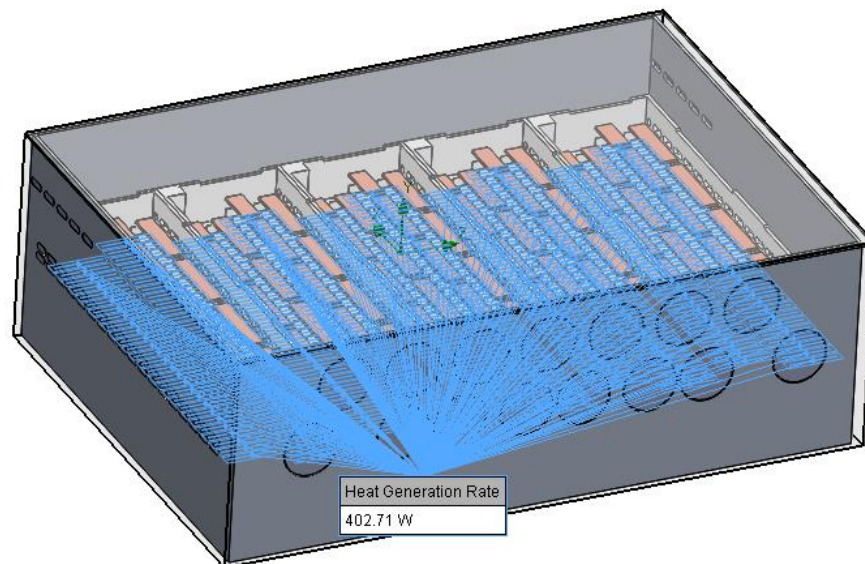


Figura 7.5 Condició de contorn de la generació a les cel·les

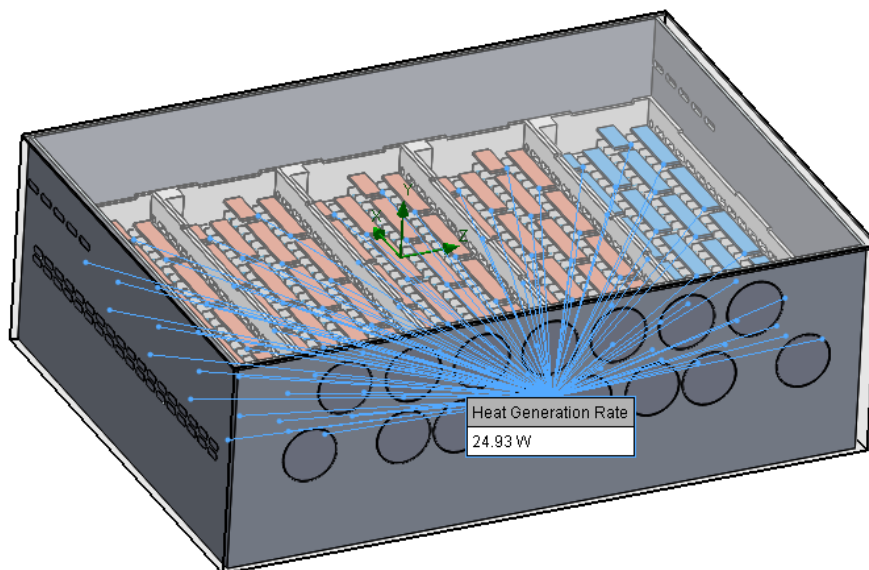


Figura 7.6 Condició de contorn de la generació a les bus-bars

La tercera font de calor, en canvi, no és senzilla de quantificar atès que depèn de la superfície i la pressió de cada contacte i, tot i que s'ha intentat estimar en els experiments realitzats al laboratori, els resultats numèrics no eren concloents, pel que s'ha decidit no tenir-ho en compte com a valor, ja que aquest podria ser tan cert com fals.

Ara bé, als experiments del laboratori va quedar palesa la existència de dissipació d'energia en forma de calor en el contacte entre cel·la i bus-bar i, en afegit, que aquesta tenia un valor del mateix ordre de magnitud que el de les cel·les. Així, no es podia desestimar la seva influència però tampoc es podia quantificar. Per tant, i donat que el punt de generació de calor pel mal contacte entre cel·les i bus-bars està en contacte directe amb els dos altres focus calents, s'ha decidit afegir un coeficient de seguretat tal que aquest inclogui les pèrdues pel mal contacte.

Aquest coeficient s'ha implementat sobre la Intensitat (I) de l'Equació 5.1 emprada per a calcular les pèrdues. S'ha establert un coeficient de seguretat $\gamma=1,4$, tot i que ja que aquest valor afecta a un terme elevat al quadrat, el resultat és una potència dissipada amb un coeficient de seguretat de $\gamma=2$. A la Taula 7.2 es poden observar els valors de les condicions de contorn un cop aplicat el coeficient de seguretat. Així, es pot assegurar que es tindrà en compte la generació de calor pel mal contacte. En afegit, aquesta decisió també es fonamenta en el fet que s'empren valors amitjanats per a simular en estacionari, quan, en realitat, les sol·licitacions de corrent per part de l'inversor i el motor varien en el temps de manera que, en instants la sol·licitació és 0 A i, en altres, són 250 A.

	Cel·les	Bus-bars
Potència dissipada (W)	402,71	24,93

Taula 7.2 Valors de les condicions de contorn de cel·les i bus-bars

Referit a les condicions de contorn del fluid, el *FlowSimulation* precisa d'una condició a l'entrada i una altra a la sortida del circuit per tal de poder resoldre les equacions. En el cas de la bateria, l'entrada són tots els forats laterals per on és aspirat l'aire, i la sortida són els ventiladors que extreuen l'aire de l'interior. Aquestes dues condicions han de ser una de cabal i una altra de pressió.

S'ha fet la suposició que la pressió a l'exterior de les entrades d'aire de la bateria seria la pressió atmosfèrica. Aquesta suposició no és del tot correcta atès que la caixa està situada a l'interior del monocasc. L'interior d'aquest si bé si que no presenta cap depressió o sobrepressió elevada, els propis ventiladors extractors de la caixa poden generar distribucions de pressions heterogènies. Per altra banda, el cabal d'aire extret és relativament petit i per tant es poden suposar unes variacions de pressió molt petites que corroboren la hipòtesi inicial.

L'altra condició de contorn, la que calia aplicar a la sortida, havia de ser de cabal. En ella cal especificar el cabal d'aire extret en m^3/s . Aquest cabal, depèn dels ventiladors que, com ja s'ha relatat anteriorment provenen d'un sponsor. El cabal d'un ventilador, però, també depèn de la pèrdua de càrrega que hagi de vèncer per a impulsar l'aire, a través d'una corba de rendiment cabal vs diferència de pressió. A les *Figura 7.7* i *Figura 7.8* es poden veure les corbes de rendiment dels ventiladors OD4020 i OD2510 respectivament.

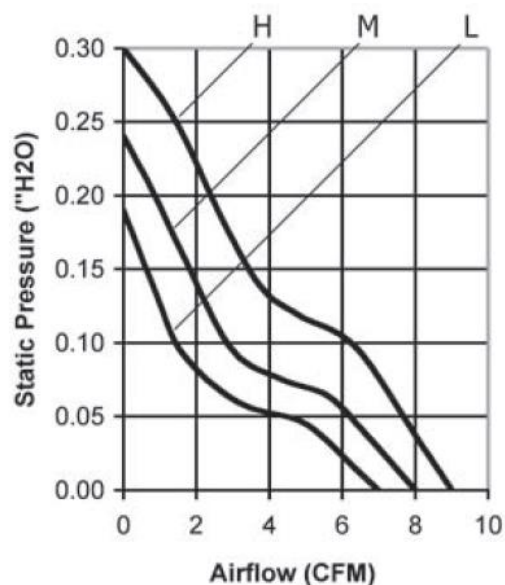


Figura 7.7 Corba de rendiment dels ventiladors OD4020

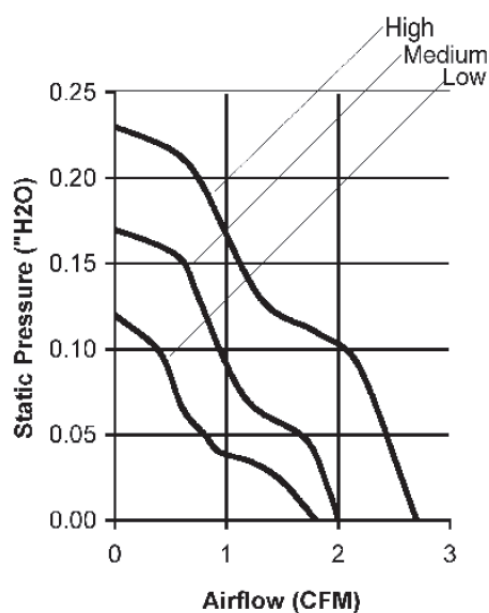


Figura 7.8 Corba de rendiment dels ventiladors OD2510

Així doncs, aquesta darrera condició de contorn, haurà de variar-se en funció de la pèrdua de càrrega que haurà de vèncer el ventilador. El programari del SolidWorks, però, no és capaç d'iterar per si sol aquest paràmetre al voltant d'una corba de rendiment, el que ha provocat que calgués fer múltiples iteracions per tal de trobar el punt de treball dels ventiladors. Si bé és cert que cada ventilador hauria de vèncer una pèrdua de càrrega concreta, que no hauria de ser la mateixa que la dels altres, s'ha fet la suposició que tots

haurien de vèncer la pèrdua de càrrega màxima i així simplificar càlculs i reduir cost computacional. Calia doncs calcular aquesta pèrdua de càrrega. Per fer-ho, calien certs valors a extreure de les simulacions.

Els resultats d'interès en les simulacions eren:

- Temperatura màxima a la superfície on estan instal·lades les NTCs
- Temperatura màxima global
- Viscositat turbulenta mitjana a l'entrada i sortida del circuit
- Pressió estàtica a la cara interior dels ventiladors

El primer resultat és de gran interès ja que és en aquella superfície on la organització controla la temperatura de la bateria. Sobrepassar els 60°C en aquell pla comportaria una desqualificació per a l'equip.

El segon també és d'importància ja que permet saber la temperatura màxima de tot el volum de control. Cal dir que, teòricament, el punt més calent de temperatura haurà de ser un de proper, si no pertanyent, al pla de sensat ja que és allà on es genera tota l'escalfor.

El tercer punt serà de gran utilitat quan s'estigui indagant en la tercera vessant anteriorment comentada, ja que la viscositat turbulenta és un molt bon indicatiu de la difusivitat turbulenta que hi ha present al circuit. I si es pren com a base l'equació de transferència de calor 7.21, on l'efecte de la viscositat turbulenta era d'ordres de magnitud superior a la difusivitat tèrmica del material, es dedueix que augmentant la esmentada viscositat turbulenta, s'augmentarà la eficiència de la transferència de calor. Per fer-ho, cal tenir en compte que el FlowSimulation empra un model k-ε on la viscositat turbulenta (*Equació 7.12*) depèn de manera quadràtica de l'energia cinètica turbulenta (k) tot i que també depèn de manera inversa del dissipació turbulenta (ε).

El darrer punt, és el més necessari per a poder fer les iteracions anteriorment comentades. S'ha pres la pressió estàtica ja que és la que apareix a la gràfica dels ventiladors, tot i que degut a la baixa velocitat de l'aire, es pot suposar igual al valor de pressió total. La pèrdua de càrrega es pot calcular partint de l'equació o trinomi de Bernoulli (*Equació 7.25*).

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = constant \quad (\text{Equació 7.25})$$

Si s'aplica a l'entrada i a la sortida, la diferència serà l'energia perduda per fricció en el circuit o pèrdues de càrrega (ΔP) (Equació 7.26).

$$\frac{V_{entrada}^2 \rho}{2} + P_{entrada} + \rho g z_{entrada} - \left(\frac{V_{sortida}^2 \rho}{2} + P_{sortida} + \rho g z_{sortida} \right) = \Delta P \quad (\text{Equació 7.26})$$

El terme de l'energia potencial ($\rho g z$), és el mateix a l'entrada i a la sortida atès que la cota z es manté; són per tant simplificables. Si es va més enllà, i s'expressa la velocitat tant a l'entrada com a la sortida en funció de les superfícies i dels cabals volumètrics, tenint en compte que per conservació de la massa aquests darrers seran iguals a entrada i sortida, i es substitueix la $P_{entrada}$ per la pressió atmosfèrica (P_{atm}), l'equació queda com segueix:

$$\frac{\left(\frac{Q}{A_{entrada}} \right)^2 \rho}{2} + P_{atm} - \left(\frac{\left(\frac{Q}{A_{sortida}} \right)^2 \rho}{2} + P_{sortida} \right) = \Delta P \quad (\text{Equació 7.27})$$

Per acabar, també cal tenir en compte les contraccions i expansions brusques del fluid. Aquestes poden arribar a doblar el coeficient cinètic de l'equació. En el cas de la bateria, només existeix una contracció forçada a l'entrada quan el fluid passa d'estar lliure a l'exterior de la caixa, a ser forçat a passar pels petits forats laterals. Aquestes contraccions suposen de l'ordre del 20% del terme cinètic pel que caldrà multiplicar-lo per 1,2. Seguint el circuit, en canvi, aquest té un volum del mateix ordre de magnitud que les entrades per anar-se expandint poc a poc fins arribar als ventiladors. Aquesta expansió, però ja està considerada pel programari ja que està dintre el volum de control. Aplicant aquest darrer canvi, el principi de Bernoulli ja queda modificat per a poder aplicar-lo en aquest cas (Equació 7.28).

$$1,2 \frac{\left(\frac{Q}{A_{entrada}}\right)^2 \rho}{2} + P_{atm} - \left(\frac{\left(\frac{Q}{A_{sortida}}\right)^2 \rho}{2} + P_{sortida} \right) = \Delta P \quad (\text{Equació 7.28})$$

P_{atm} és un valor conegut (101325 Pa) així com també ho és $A_{Sortida}$ que no és més que la superfície total dels ventiladors (*Equació 7.29*).

$$A_{sortida} = 15 \cdot \pi \cdot \left(\frac{38,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 0,01746 m^2 \quad (\text{Equació 7.29})$$

Pel que fa a la densitat de l'aire (ρ) s'ha pres un valor gràficat ($\rho = 1,08 \text{ Kg/m}^3$) que correspon a un aire sec a una temperatura de 50°C i una pressió lleugerament per sota de la atmosfèrica. Aquest valor s'ha comprovat en les primeres simulacions i ja que no variava en absolut al aplicar canvis de la geometria, s'ha decidit prendre aquest valor fix per a l'*equació 7.28* per tal de reduir el cost computacional. La pressió de sortida ($P_{sortida}$), en canvi, és necessari extreure-la de la simulació.

Així, el procés per a solucionar cada cas, és un procés iteratiu fet manualment on després de cada simulació es recalcula la pèrdua de càrrega amb els resultats obtinguts. Seguidament a través de la gràfica de rendiment del ventilador es troba el cabal. Aquest es compara amb l'inicial i si disten més d'un 10% es reajusta i es torna a simular.

Abans d'iniciar els càlculs, però, cal definir el coeficient de convecció de la simulació. Aquest és necessari ja que el programari té una funció atenuant de la turbulència quan aquesta s'apropa a les parets fins que tendeix a zero. Per tal de trobar-lo, s'ha partit de valors teòrics tabulats per a fluxos laminars en funció de la velocitat de l'aire. Aquesta, tal com s'ha comprovat en les simulacions que segueixen en aquest document, està compresa entre 3 i 0,8 m/s. S'ha escollit el cas de fluxos laminars ja que, com es veurà a les simulacions que segueixen, els nombres de Reynolds tant a l'entrada com a la sortida i també a l'interior, pertanyen majoritàriament a flux en situació laminar. El coeficient, però, també depèn de la rugositat del material de la superfície. Aquest efecte, però, si bé si que té una gran importància a grans velocitats, aquesta no és tan gran a baixes velocitats. Per aquests valors de velocitats i una rugositat mitjana i tal com es pot observar a la *Figura 7.9*, hi correspon un coeficient de convecció proper a $h = 18 \text{ W m}^2 / \text{K}$.

Aquest valor ha estat consensuat entre membres del departament de Màquines i Motors Tèrmics de la universitat pel que es pren com a vàlid.

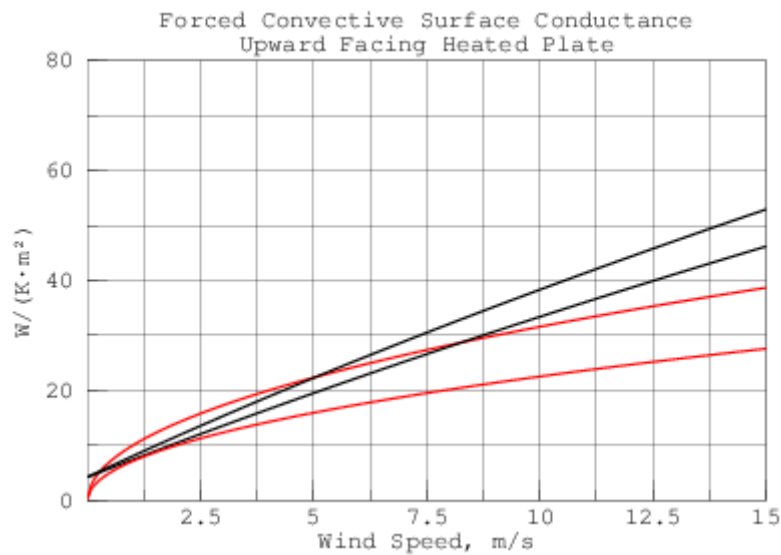


Figura 7.9 Gràfica coeficient de convecció vs velocitat d'aire [12]

Un cop definits tots els paràmetres i condicions de contorn necessaris ja era possible començar les simulacions, abans però, calia realitzar el mallat. El SolidWorks té un mallador propi automàtic que refina els contorns per si sol tal com s'ha comentat en el punt anterior. El mallat realitzat consta de 660000 elements, 160000 dels quals pertanyen a elements de fluid, 170000 a sòlid i 330000 a cel·les parcials. A la *Figura 7.10* es poden veure tots aquests grups en blau, vermell i verd, respectivament.

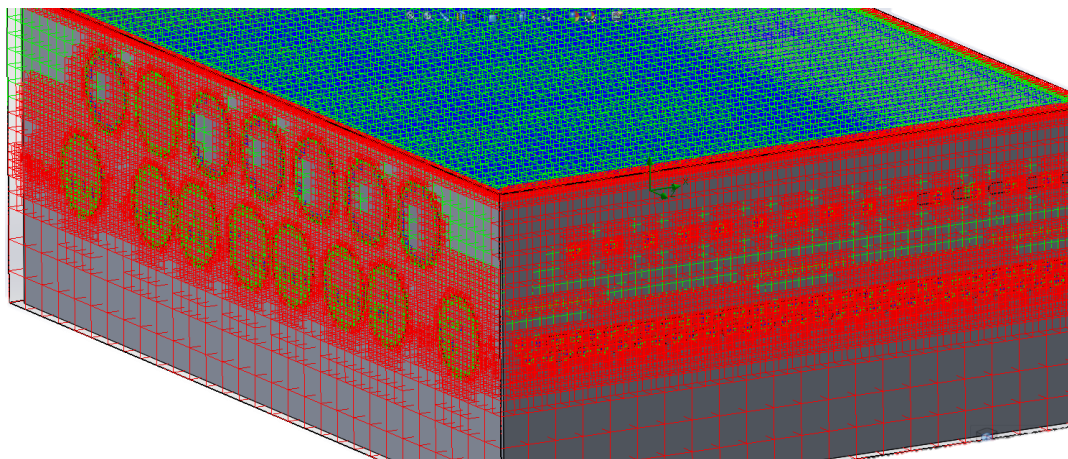


Figura 7.10 Mallat de la simulació

7.3.1. Concepte de la refrigeració de la bateria del CAT09e

Per decidir el concepte de la refrigeració de la bateria del CAT09e, s'han fet unes suposicions partint dels resultats de simular la bateria del CAT08e amb el mètode anteriorment comentat.

Per tal de fer-ho, ha estat necessari modificar les condicions de contorn tant de generació de calor a les bus-bars (*Taula 7.3*), com la de l'àrea de sortida que, pel fet d'haver dos mides de ventiladors diferents es separa en dues equacions (*Equació 7.30* i *7.31*).

	CAT08e	CAT09e
Calor dissipada a les bus-bars (W)	29,91	24,93

Taula 7.3 Generació a les bus-bars CAT08e i CAT09e

$$A_{OD2510} = \pi \cdot 13 \cdot \left(\frac{24 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 0,00588 m^2 \quad (\text{Equació 7.30})$$

$$A_{OD4020} = \pi \cdot 5 \cdot \left(\frac{38,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 0,00582 m^2 \quad (\text{Equació 7.31})$$

Per tal de poder aplicar la *Equació 7.28*, cal modificar-la per a tenir en compte dos valors de cabals de sortida diferents (*Equació 7.32*).

$$1,2 \frac{\left(\frac{Q}{A_{entrada}} \right)^2 \rho}{2} + P_{atm} - \left(\frac{\left(\frac{Q_{OD2510}}{A_{OD2510}} \right)^2 \rho}{2} + \frac{\left(\frac{Q_{OD4020}}{A_{OD4020}} \right)^2 \rho}{2} + P_{sortida} \right) = \Delta P \quad (\text{Equació 7.32})$$

Un cop adaptades les equacions i les condicions de contorn, ja es podia fer la simulació. A continuació s'exposen els resultats finals del cas.

	Bateria CAT08e
Global Temperature (°C)	76,29
Surface Temperature (°C)	76,18
Static Pressure OD2510 (Pa)	101308,9
Static Pressure OD4020 (Pa)	101268,7
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,009
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,110

Taula 7.4 Resultats simulació refrigeració CAT08e

A continuació es poden veure una sèrie de paràmetres fàcilment calculables que són o seran d'interès per a comparar en les simulacions que seguiran (*Taula 7.5*).

	v_{entrada} (m/s)	v_{sortida} (m/s)	Re_{entrada}	Re_{sortida}	
	3,6496	0,5483	930,538	1037,144	
	Cabal n (m³/s)	ΔP (Pa)	ΔP (in h₂O)	Cabal n+1 (CFM)	Cabal n+1 (m³/s)
OD4020	0,004	20,0	0,0805	10	0,0047
OD2510	0,00132	56,7	0,2280	3,12	0,0014

Taula 7.5 Paràmetres d'interès simulació refrigeració CAT08e

De les taules anteriors es poden deduir diferents aspectes. El principal i més important és que la temperatura era molt superior a 60°C. Un altre aspecte són els valors de l'energia turbulenta. Aquests són molt baixos tant a l'entrada com a la sortida. Elevar aquests valors faria més eficient la transferència de calor. Un factor influent en això és el nombre de Reynolds (*Equació 7.33*). Aquest és molt baix tant a l'entrada com a la sortida.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Equació 7.33})$$

On ρ és la densitat de l'aire, valor ja conegut ($\rho = 1,08 \text{ kg/m}^3$). μ és la viscositat dinàmica de l'aire que, a 50°C pren el valor de $\mu = 1,95 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. v_s és la velocitat del fluid en aquell punt que, com ja s'ha comentat anteriorment es calcula com el cabal entre la superfície. Pel que fa a D , és el diàmetre dels forats.

Els forats laterals del CAT08e eren de 4 mm de diàmetre. Com ja s'ha comentat anteriorment, per aquests forats no hi pot entrar una vara de 6mm de diàmetre. Per aquesta temporada i partint del baix nombre de Reynolds i la baixa viscositat turbulenta a l'entrada, s'ha decidit que el disseny inicial en quant a forats laterals es refereix, serien de 5 mm de diàmetre.

A part dels resultats numèrics, també es poden extreure valuoses conclusions de les representacions visuals. Així, a continuació es poden veure gràfics de línies de corrent (*Figura 7.11*) i de distribucions de temperatures (*Figura 7.12*).

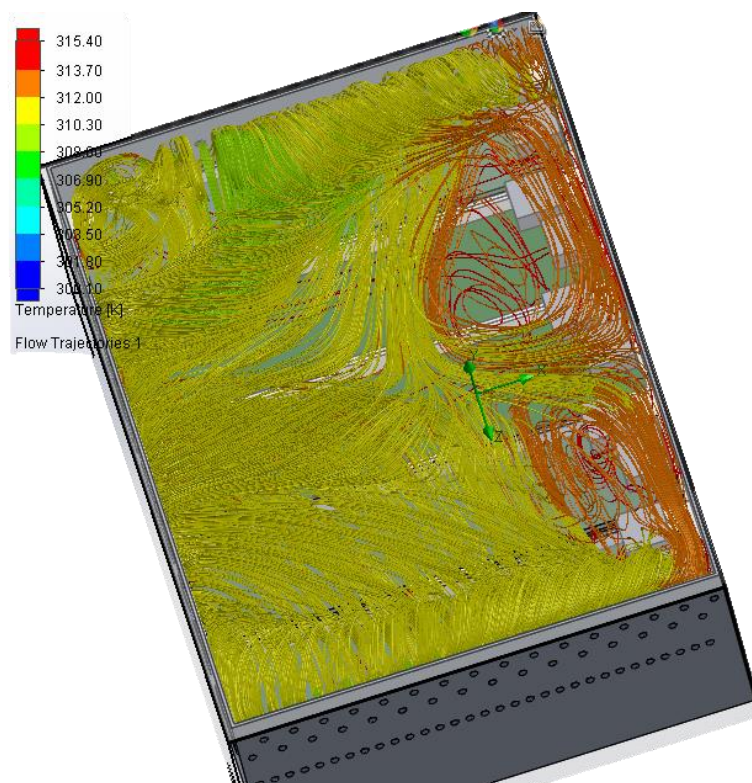


Figura 7.11 Línies de corrent refrigeració CAT08e

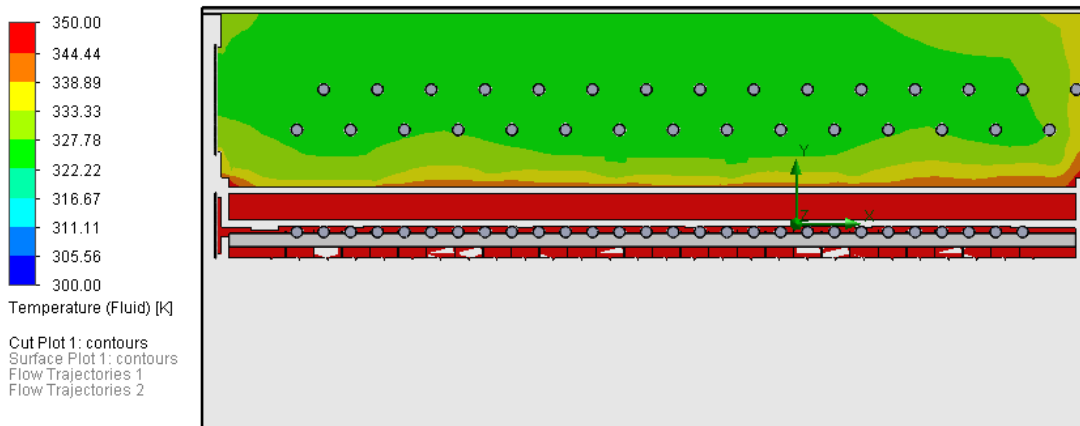


Figura 7.12 Distribució de temperatures del CAT08e en un tall de secció

A la primera figura es pot observar clarament com existeix un bypass massiu d'aire fred sortint de la bateria i no permetent fer-ho al calent. Per tal d'evitar aquest fenomen, aquest any es comptes de dues línies de forats superiors, es començarà el disseny iteratiu amb només una.

La segona figura és la distribució de temperatures en un tall de la secció longitudinal de la caixa. En ella, es pot observar com la zona dels borns també és una zona molt susceptible a escalfar-se. Per això, aquest any, s'ha decidit apujar la placa inferior de la connexió de potència per tal de deixar un espai de 5 mm on s'hi ha instal·lat una altra línia de forats inferior per a començar les iteracions de disseny. En afegit, per tal de facilitar el camí a l'aire i evitar escalfar el BMS, s'ha decidit situar-lo sobre la tapa de cada *stack* amb uns espaiadors de manera que la seva alçada podrà ésser simulada per tal d'optimitzar-la. A continuació es pot veure dues imatges comparatives i esquemàtiques entre un *stack* del CAT08e (Figura 7.13), i un *stack* del CAT09e (Figura 7.14).

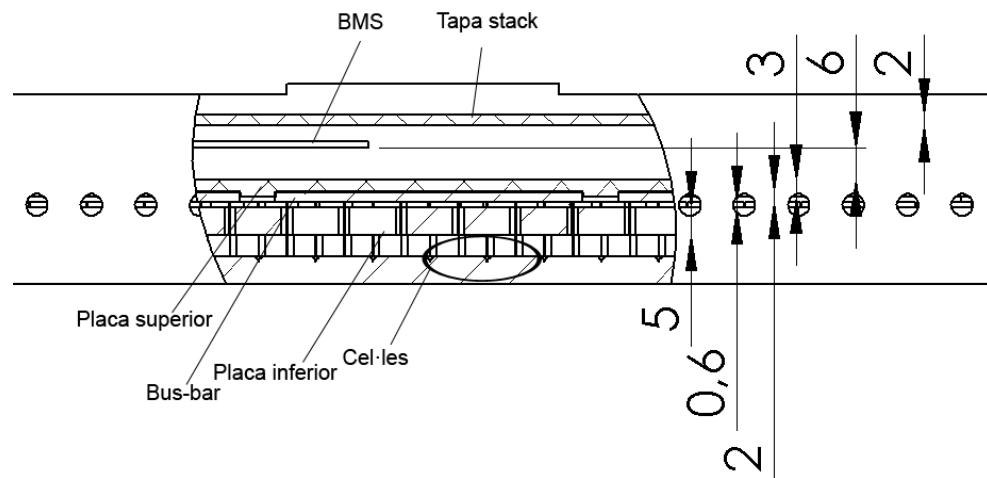


Figura 7.13 Plànol explicatiu distribució stack CAT08e

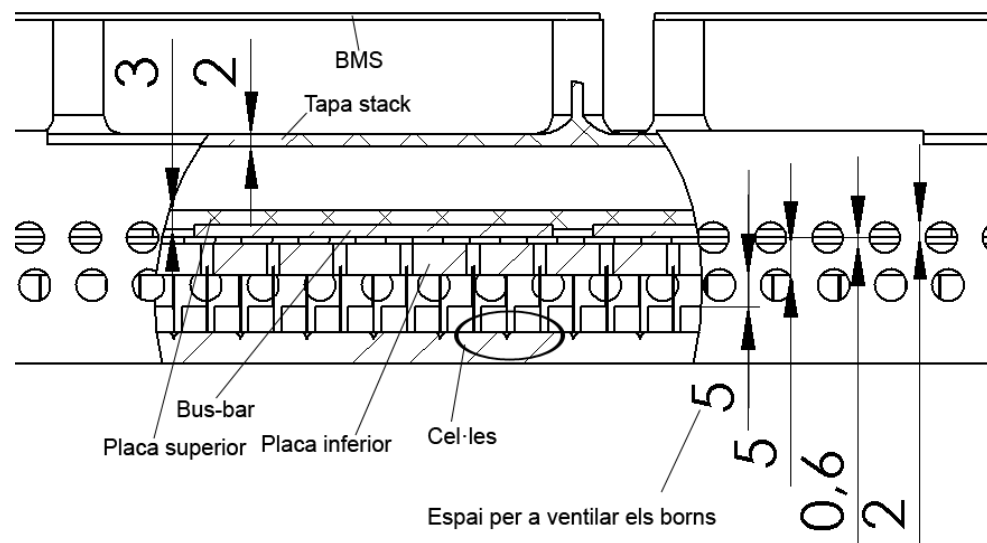


Figura 7.14 Plànol explicatiu distribució stack CAT09e

A la *Figura 7.11*, també es pot apreciar com el fluid que està sota la tapa de l'*stack* està sensiblement més calent que el de sobre ($\Delta T = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Així s'ha decidit variar el diàmetre i la distància entre els forats de tant la placa superior de connexió de potència com de la tapa dels stacks. A la següent *Taula* es poden veure els dos paràmetres de cada placa del CAT08e i del CAT09e.

	CAT08e		CAT09e	
	Placa superior	Tapa <i>stack</i>	Placa superior	Tapa <i>stack</i>
Diàmetre forat (mm)	3	4	4	6
Separació forats (mm)	35	40	20	20

Taula 7.6 Diferències dels forats de la caixa entre CAT08e i CAT09e

Cal dir que pel CAT09e s'ha optat pel major diàmetre possible. En la placa superior de la connexió de potència s'han escollit de 4 mm de diàmetre ja que és el diàmetre màxim que es podia encabir entre les bus-bars. Pel que fa als 6 mm de diàmetre dels forats de la tapa dels *stacks*, si bé la normativa fixa que no s'ha de poder accedir a les connexions de potència amb una vara de 6 mm de diàmetre, aquesta normativa s'aplica des de l'exterior de la caixa i, les tapes, estan localitzades a l'interior.

Un cop aplicades totes aquestes variacions al model emprat per a fer les simulacions, s'ha procedit a simular la idea bàsica de refrigeració del CAT09e (*Figura 7.15*). Abans, però, es llisten totes les variacions que s'han fet respecte el CAT08e:

- Augment de l'amplada de les bus-bars de 10 mm a 12 mm per a generar menys calor.
- Nou concepte i distribució dels ventiladors posteriors per extreure un major cabal d'aire.
- Eliminació d'una de les fileres superiors de forats laterals per tal d'evitar bypassos.
- Elevació de 5 mm de la placa inferior de la connexió de potència sumada a la aparició d'una filera de forats laterals per tal de ventilar els borns de les cel·les.
- Augment del diàmetre dels forats laterals de 4 a 5 mm.
- Extracció del BMS fora de la tapa de l'*stack* per a generar espai.

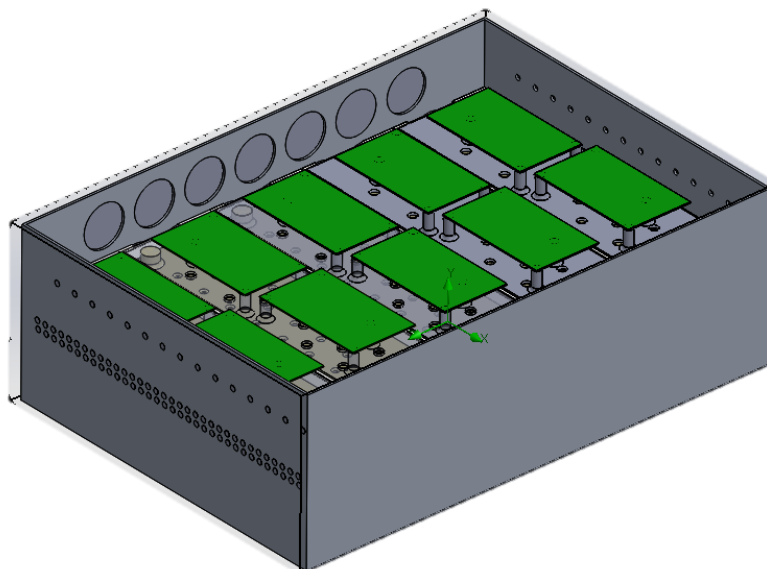


 Figura 7.15 Simulació base de la refrigeració del CAT09e

A la *Taula 7.7* es poden veure els resultats finals i alguns paràmetres d'interès.

	Simulació base CAT09e
Global Temperature (°C)	65,21
Surface Temperature (°C)	64,58
Static Pressure sortida (Pa)	101262,81
Cabal n (m³/s)	0,0112
ΔP (Pa)	62,19
ΔP (in h₂O)	0,2499
Cabal n+1 (CFM)	23,55
Cabal n+1 (m³/s)	0,0111

 Taula 7.7 Resultats simulació base CAT09e

Les hipòtesis realitzades semblen ser correctes ja que es redueix considerablement la temperatura. Tot i així, encara es dista dels 60°C desitjats.

7.3.2. Reduir la pèrdua de càrrega

Reduir la pèrdua de càrrega és una manera fàcil de reduir la temperatura de funcionament de la bateria. Si s'aconsegueix obtenir un circuit amb menor pèrdua de càrrega, els ventiladors seran capaços de fer passar un major cabal d'aire per l'interior de la bateria que, a la seva vegada, resultarà en major velocitat de circulació d'aire i, en conseqüència una major viscositat turbulenta o el que és el mateix: una major transferència de calor.

Les pèrdues de càrrega estan produïdes majoritàriament per dos fenòmens: la fricció del fluid amb les superfícies i el desprendiment de la capa límit degut a canvis bruscos de la geometria.

El primer fenomen és impossible d'evitar. El segon, però, sí que es pot millorar. La primera millora que s'ha avaluat és arrodonir les vores de tots els forats possibles per on passa el fluid de dintre la bateria.

En el CAT08e, tant les plaques superiors de la connexió de potència com les tapes dels *stacks* eren de policarbonat tallat amb làser. Això fixava que la secció fos constant. Aquest any, però, s'ha optat pel *Rapid Prototyping* de sinteritzat de poliamida ja que presenta una enorme versatilitat com a conseqüència de que es pot fer qualsevol forma, el que redueix el nombre de peces encolades. Així doncs, s'ha obert la possibilitat d'arrodonir els forats d'aquestes dues plaques (*Figura 7.16*).

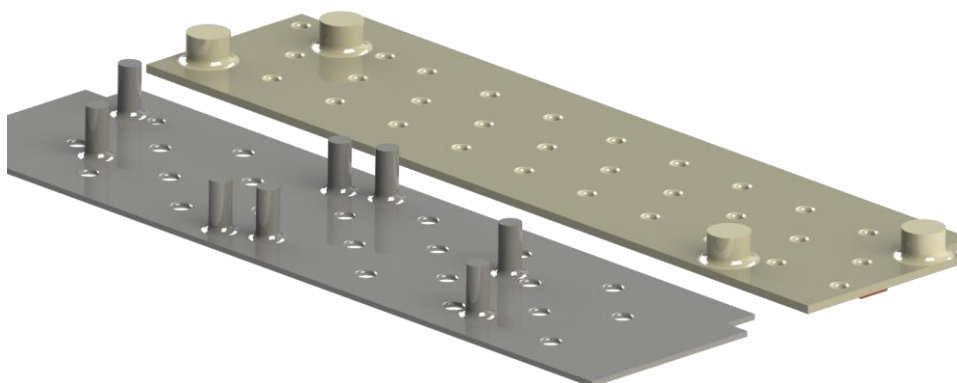


Figura 7.16 Placa superior i tapa amb forats arrodonits

Altres forats, però, no ha estat possible arrodonir-los com els dels stacks o els de la caixa. Els primers ja que era talls làser d'alumini d'1 mm de gruix. Els segons, eren també talls làser d'alumini, però de 2 mm que, si bé si que es poden arrodonir a mà amb una llima, al ja ser de 5mm, la reducció de material podria fer en alguns casos sobrepassar els 6 mm que fixa la normativa.

A la *Taula 7.8* es poden veure els resultats i alguns paràmetres d'interès de la simulació.

	Simulació forats arrodonits
Global Temperature (°C)	63,83
Surface Temperature (°C)	63,16
Static Pressure sortida (Pa)	101263,51
Cabal n (m³/s)	0,0114
ΔP (Pa)	61,49
ΔP (in h₂O)	0,2471
Cabal n+1 (CFM)	24,00
Cabal n+1 (m³/s)	0,0113

Taula 7.8 Resultats simulació forats arrodonits

És senzill comprovar que ha estat una decisió encertada ja que, d'aquesta manera, s'ha reduït mig grau Celsius i s'ha augmentat el cabal un 3% que, tot i semblar poc, és un guany "gratuït" ja que no implica ni despesa energètica extra per part de la bateria de control, ni suposa inversió econòmica.

Amb els resultats gràfics de la *Figura 7.17* on es poden veure les línies de corrent, s'observa com l'aire provinent de sota el BMS té dificultats per a bordejar-lo i ser extret per la línia superior de ventiladors. Per aquest motiu, s'ha decidit simular el BMS a diferents alçades. Les simulacions actuals el tenien a 10 mm de la tapa dels *stacks* i, s'ha simulat una alçada de 18 mm, que el situava centrat en l'espai lliure superior de la caixa.

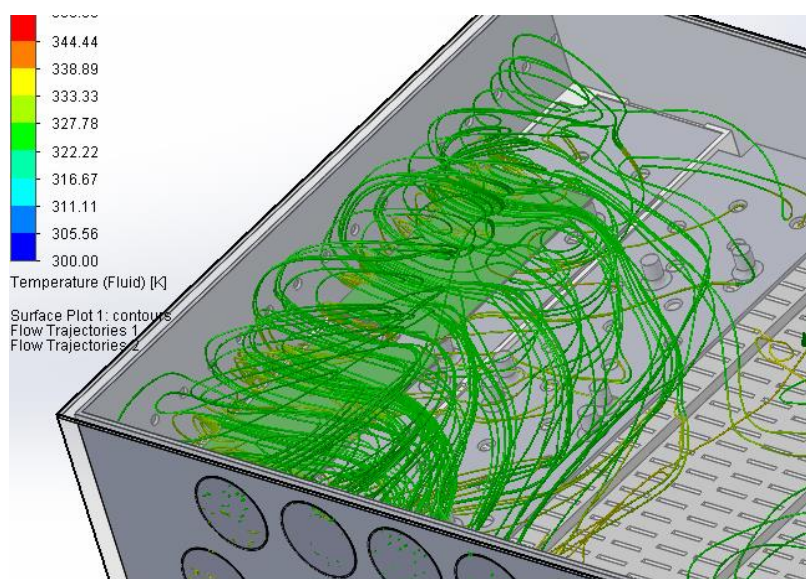


Figura 7.17 Línies de corrent al voltant del BMS a 10 mm

A continuació es poden veure els resultats comparats amb el BMS a 10 mm i a 18 mm de la tapa dels *stacks*.

	Simulació BMS a 10 mm	Simulació BMS a 18 mm
Global Temperature (°C)	63,83	63,63
Surface Temperature (°C)	63,16	62,94
Static Pressure sortida (Pa)	101263,51	101263,47
Cabal n (m³/s)	0,0114	0,0114
ΔP (Pa)	61,49	61,53
ΔP (in h₂O)	0,2471	0,2472
Cabal n+1 (CFM)	24,00	24,00
Cabal n+1 (m³/s)	0,0113	0,0113

Taula 7.9 Resultats comparatius diferents alçades BMS

Tot i que la pèrdua de càrrega es manté pràcticament al mateix valor, al apujar el BMS, els ventiladors superiors han succionat més de l'aire escalfat de l'interior dels *stacks* (Figura 7.18), aconseguint així una petita millora en la temperatura. Per tant, la decisió és elevar el BMS fins als 18 mm respecte la tapa de l'*stack* per al CAT09e.

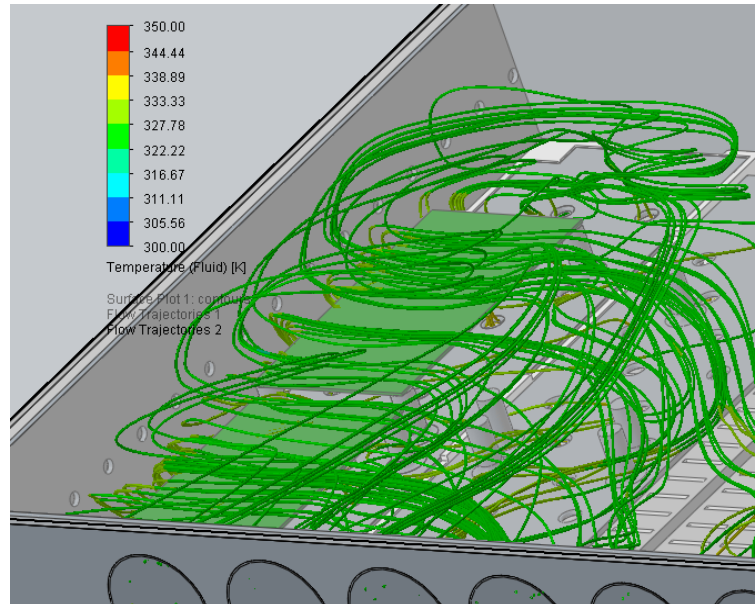


Figura 7.18 Línies de corrent al voltant del BMS a 18 mm

Un cop observada la millora al variar l'alçada del BMS, s'ha decidit que una altra cota que es podria modificar per tal de deixar més espai de maniobra al fluid és la profunditat de l'encastament de les bus-bars. Com ja s'ha comentat, aquestes tenen 2 mm de gruix i al CAT08e estaven encastades 1 mm dintre la placa superior de connexió de potència. Tot i que el marge és petit, s'ha decidit fer simulacions amb diferents profunditats d'encastament: 1 mm (Figura 7.19), 0,7 mm (Figura 7.20) i 0,5 mm (Figura 7.21).

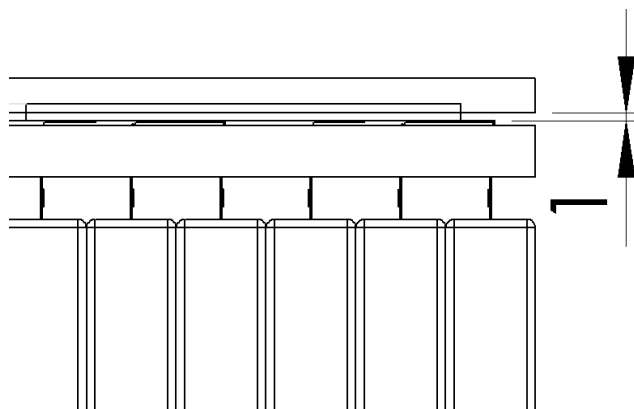


Figura 7.19 Bus-bar encastada 1 mm

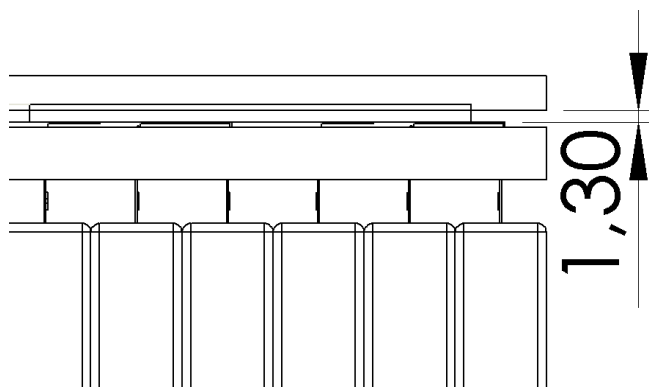


Figura 7.20 Bus-bar encastada 0,7 mm

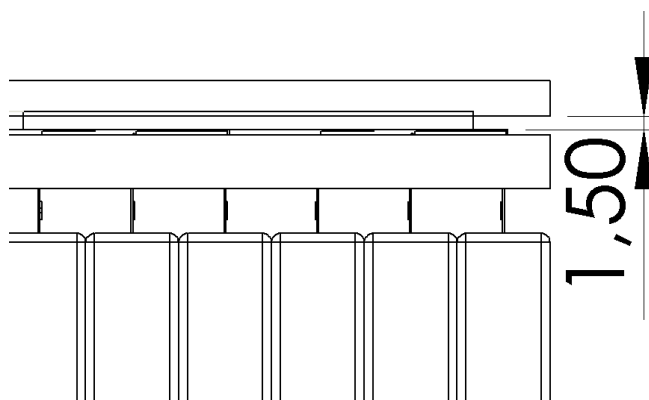


Figura 7.21 Bus-bar encastada 0,5 mm

A la *Taula 7.10* es poden veure els resultats de les tres cotes diferents d'encastament de les bus-bars.

	Bus-bar encastada 1 mm	Bus-bar encastada 0,7 mm	Bus-bar encastada 0,5 mm
Global Temperature (°C)	63,63	63,27	63,20
Surface Temperature (°C)	62,94	62,57	62,49
Static Pressure sortida (Pa)	101263,47	101263,31	101263,77
Caball n (m³/s)	0,0114	0,01175	0,01185

ΔP (Pa)	61,53	61,69	61,23
ΔP (in h_2O)	0,2472	0,2479	0,2461
Cabal n+1 (CFM)	24,00	24,00	24,6
Cabal n+1 (m^3/s)	0,0113	0,0113	0,0116
Volum lliure (cm^3)	158,46	182,65	198,77

Taula 7.10 Resultats comparatius diferents gruixos d'encast de les bus-bars

Com era d'esperar com menor és l'encastament més volum d'aire hi ha, amb el seu conseqüent augment del cabal i disminució de la temperatura. Ara bé, tenint en compte que cada bus-bar té un potencial diferent, (ja que són les encarregades de fer les connexions en sèries de les cel·les) s'ha cregut massa arriscat només deixar 0,5 mm per a encolar-les a la placa superior. Per tant, s'ha escollit la opció d'encastar-les 0,7 mm.

La darrera modificació que s'ha pensat ha estat substituir les dues línies de forats circulars de 5 mm de diàmetre de les parets dels *stacks* que estan en contacte amb els ventiladors, per dues ranures contínues que els englobi a tots i del mateix diàmetre. A la *Figura 7.22* es pot veure la comparació entre els forats del CAT08e i les noves ranures.

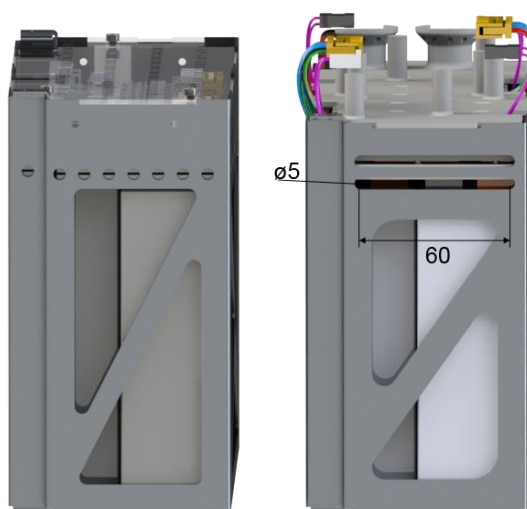


Figura 7.22 Representació ranures davanteres

A continuació, a la *Taula 7.11* es poden veure els resultats enfrontats entre els forats i les ranures.

	Simulació amb forats de 5 mm	Simulació amb ranures
Global Temperature (°C)	63,27	61,58
Surface Temperature (°C)	62,57	60,87
Static Pressure sortida (Pa)	101263,31	101265,56
Cabal n (m³/s)	0,01175	0,0127
ΔP (Pa)	61,69	59,35
ΔP (in h₂O)	0,2479	0,2385
Cabal n+1 (CFM)	24,00	27,00
Cabal n+1 (m³/s)	0,0113	0,0127

Taula 7.11 Resultats comparatius forats davanters i ranures davanters

La millora és més que evident. Es millora més d'un grau Celsius i s'augmenta el cabal un 8%. És per tant, una molt bona millora que serà implementada.

Amb aquest darrer canvi s'ha posat fi pel que es refereix a les simulacions per a reduir la pèrdua de càrrega. Ara resta indagar en la distribució dels forats laterals per tal de reduir encara més la temperatura de funcionament de la bateria.

7.3.3. Distribució superfície d'entrada

La distribució dels forats laterals inferiors del CAT08e era uniforme i estaven separats 10 mm (30 forats a tota la línia). Per tal de comprovar l'efecte de la separació i, en conseqüència del nombre de forats que hi ha, s'han simulat diferents configuracions de separacions:

- Ambdues files separats 9 mm (33 forats a cada línia)
- A la fila superior separats 8 mm (37 forats) i a la inferior 9 mm (33 forats)
- Ambdues files separats 8 mm (37 forats a cada línia)
- A la fila superior separats 9 mm (33 forats) i a la inferior 8 mm (37 forats)

Amb aquestes simulacions, a més, es volia trobar quina influència tenia en la temperatura variar per separat cada línia inferior de forats.

Els resultats de les quatre simulacions es poden veure a la *Taula 7.12*.

	Sup. 9 Inf. 9	Sup. 8 Inf. 9	Sup. 8 Inf. 8	Sup. 9 Inf. 8
Global Temperature (°C)	60,90	60,81	60,57	60,72
Surface Temperature (°C)	60,15	60,04	59,77	59,96
Static Pressure sortida (Pa)	101267,13	101266,73	101267,38	101268,00
Caball n (m³/s)	0,0135	0,0136	0,0138	0,0137
ΔP (Pa)	57,87	58,27	57,62	57,00
ΔP (in h₂O)	0,2326	0,2342	0,2316	0,2291
Caball n+1 (CFM)	28,50	28,50	29,55	29,25
Caball n+1 (m³/s)	0,0135	0,0135	0,0139	0,0138

Taula 7.12 Resultats diferents configuracions de forats d'entrada

Els resultats són els esperats. A major nombre de forats, menor és la temperatura. Per aquest motiu s'ha modificat la separació dels forats a 8 mm per a les properes simulacions. Aquesta era la separació mínima ja que amb aquesta configuració restaven 3 mm de material entre forats i per tal d'evitar problemes en la rigidesa estructural de la caixa no s'ha volgut anar més enllà. Pel que fa a importància d'una línia o l'altra, ha quedat demostrat que les dues tenen la mateixa influència sobre el resultat.

Aquests resultats, han fet plantejar-se que cal aprofundir en el principi teòric al que afecta aquesta variació de geometria. I aquest és el de la viscositat turbulenta. Així, en aquest apartat, a més, es buscarà trobar una configuració de forats laterals d'entrada que provoquin la major viscositat turbulenta des de l'inici per així millorar la transferència de calor de tot el circuit.

Per fer-ho, en un model k-ε com el del SolidWorks, aquest paràmetre depèn de forma quadràtica de l'energia cinètica turbulenta (k) (*Equació 7.12*). Una manera simple d'augmentar l'energia cinètica turbulenta és augmentar el nombre de Reynolds (*Equació 7.34*) que es pot veure a continuació. Un Reynolds turbulent (>10000) o com a mínim en règim de transició (2100<Re<10000) és molt important ja que la transferència de calor augmentaria molt.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Equació 7.34})$$

Els dos paràmetres més importants per aquest objectiu són la velocitat del fluid i el diàmetre dels forats. Per augmentar el nombre de Reynolds, cal augmentar ambdós valors. Això, no és tan senzill com sembla ja que si s'augmenta el diàmetre dels forats, el cabal augmentarà una mica però, degut a que les parets de dintre el circuit segueixen en la mateixa posició, les forces de fricció es mantenen i aquest augment no és suficient com per a què la velocitat del fluid per les entrades sigui equivalent.

Això és a conseqüència que la velocitat depèn del cabal i de l'àrea. I aquesta depèn, lògicament, del diàmetre. Així, es pot expressar l'equació del nombre de Reynolds en funció d'aquestes variables per arribar a la següent expressió:

$$Re = \frac{\rho \cdot 4 \cdot Q}{\mu \cdot \pi \cdot D} \quad (\text{Equació 7.35})$$

Existeix per tant una relació inversa entre cabal (Q) i diàmetre dels forats laterals (D). Això és un inconvenient ja que ambdós tenen una dependència directa a través de les equacions de Navier-Stokes (*Equació 7.7*).

Ha calgut per tant, afegir un resultat a calcular en les simulacions que, tot i augmentar el cost computacional d'aquestes, és la única opció per tal de trobar un valor de referència d'aquest fenomen. Aquest paràmetre és la viscositat turbulenta (ν_T) tant a l'entrada com a la sortida per tal de comprovar com afectaven les variacions als forats laterals.

La primera modificació que s'ha volgut estudiar ha estat l'efecte de reduir la llargada de la línia de forats superiors. Així, es volia intentar reduir el possible bypass existent i augmentar tant la succió de l'aire calent que circula per l'interior de l'*stack* com la viscositat turbulenta a l'entrada i a la sortida. Per tal de comprovar aquesta hipòtesi, calia eliminar forats davanters de la línia superior.

S'han fet tres simulacions. L'actual, amb tota la línia superior de forats completa (amb tots els forats negres, vermells i blaus). Una amb la meitat posterior dels forats de la línia superior (sense els forats vermells). I una darrera amb només el terç posterior de la línia de forats superior (sense els forats vermells ni els blaus) (*Figura 7.23*).



Figura 7.23 Esquema dels tres casos d'estudi preliminar de distribució superior

Els resultats d'aquestes tres simulacions es poden veure en la *Taula 7.13* de forma comparativa.

	Completa	Meitat	Terç
Global Temperature (°C)	60,57	60,36	60,18
Surface Temperature (°C)	59,77	59,50	59,34
Static Pressure sortida (Pa)	101267,38	101266,87	101265,63
Caball n (m³/s)	0,0138	0,0136	0,0131
ΔP (Pa)	57,62	58,13	59,37
ΔP (in h₂O)	0,2316	0,2336	0,2386
Caball n+1 (CFM)	29,55	28,8	27,75
Caball n+1 (m³/s)	0,0139	0,0136	0,0131
v_{entrada} (m/s)	4,062	3,981	3,660
v_{sortida} (m/s)	0,790	0,779	0,687
Re_{entrada}	1295	1269	1166
Re_{sortida}	2015	1986	1752
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,022	0,025	0,027
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,57	0,63	0,70

Taula 7.13 Resultats diferents configuracions de la línia superior de forats

De la taula anterior es pot extreure que la introducció del paràmetre viscositat turbulenta era necessari atès que tant el Reynolds d'entrada com el de sortida han decrescut conforme s'eliminaven forats. Això faria pensar que la temperatura s'hauria d'incrementar però no ha estat així. La viscositat turbulenta, en canvi, sí que ha augmentat, sobretot en la sortida.

Això fa concloure que, si bé en l'entrada l'efecte de reduir el nombre de forats pot ser negatiu, en l'interior de la bateria aquest fet fa augmentar l'energia cinètica turbulenta i, per tant, disminuir la temperatura. És per aquest motiu que s'ha cregut que la millor opció és reduir la línia superior de forats al darrer terç.

Tot seguit i amb l'experiència de la gran millora que ha suposat unir els forats davanters dels *stacks* en una ranura, s'ha decidit provar de fer-ho amb els forats laterals. Ara bé, com que en aquest cas no només s'ha de foradar l'*stack* com en el cas davanter, sinó que també cal foradar la caixa i, aquesta, ha d'aguantar grans esforços tal com imposa la normativa, no ha estat possible aplicar el concepte de la mateixa manera. No obstant això, i després que les pertinents simulacions estructurals hagin estat realitzades, s'ha decidit simular una variació amb ranures que uneixen forats dos a dos com es pot observar a la *Figura 7.24*

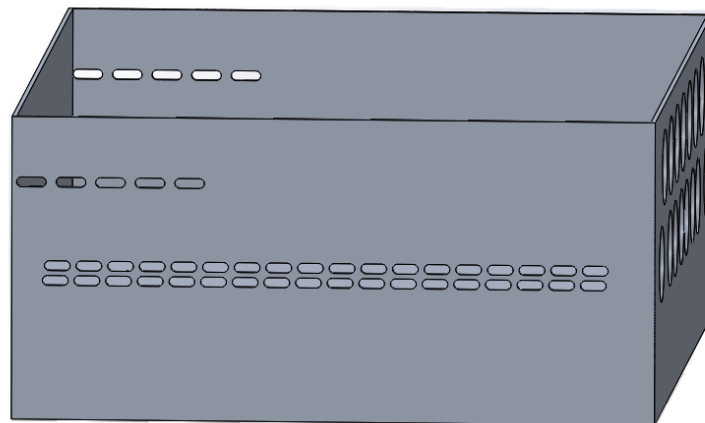


Figura 7.24 Simulació amb ranures laterals

A la *Taula 7.14* es resumeixen els resultats i paràmetres d'interès en format comparatiu entre el cas previ amb forats i el cas de ranures juntant els forats de dos en dos.

	Forats	Ranures
Global Temperature (°C)	60,18	59,19
Surface Temperature (°C)	59,34	58,50
Static Pressure sortida (Pa)	101265,63	101269,84
Caball n (m³/s)	0,0131	0,0150

ΔP (Pa)	59,37	58,49
ΔP (in h_2O)	0,2386	0,2350
Cabal n+1 (CFM)	27,75	31,2
Cabal n+1 (m^3/s)	0,0131	0,0147
$v_{entrada}$ (m/s)	3,660	2,627
$v_{sortida}$ (m/s)	0,687	0,859
$Re_{entrada}$	1166	830
$Re_{sortida}$	1752	2170
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,027	0,020
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,70	0,90

Taula 7.14 Resultats comparatius entre forats i ranures

Els resultats són molt positius. S'aconsegueix una reducció generalitzada de pràcticament 1 °C. L'augment en la secció d'entrada fa reduir la velocitat d'entrada i com a conseqüència el Reynolds, però, també redueix molt la pèrdua de càrrega; cosa que fa augmentar el cabal i augmentar la viscositat turbulenta. Si s'aprofundeix en aquest paràmetre, es veu com a l'inici la viscositat es redueix respecte al cas anterior, però el major flux d'aire fa augmentar el paràmetre molt més durant el circuit que en el cas anterior. Per tant, s'ha optat per les ranures com a formes geomètriques finals per les entrades d'aire de la bateria.

Un cop decidida la forma geomètrica desitjada, calia afinar la posició dels forats per tal d'evitar bypassos no desitjats. En aquesta línia s'han estudiat tres casos que afectaven a les dues línies inferiors de forats. S'ha optat per a simular un cas amb una ranura menys a cada fila i un altre amb tres ranures menys a cada fila i comparar els resultats amb els anteriors.

A la *Figura 7.25* es pot veure de manera esquemàtica els tres casos estudiats. Amb tots els forats seria el cas base. Si s'eliminen els forats vermells seria el cas amb una ranura menys i si, pel contrari, se suprimeixen les ranures vermelles i blaves, s'estaria en el darrer cas on s'eliminen tres ranures.

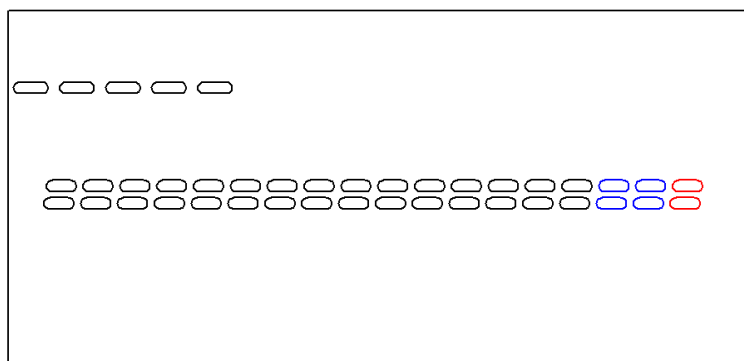


Figura 7.25 Esquema dels tres casos d'estudi de bypass inferior de ranures

Així, a la *Taula 7.15* es poden observar els resultats comparatius entre els tres casos.

	Completes	Una ranura menys	Tres ranures menys
Global Temperature (°C)	59,19	59,32	59,47
Surface Temperature (°C)	58,50	58,64	58,83
Static Pressure sortida (Pa)	101269,84	101270,68	101268,62
Cabal n (m³/s)	0,0150	0,0145	0,0140
ΔP (Pa)	58,49	57,76	60,45
ΔP (in h₂O)	0,2350	0,2321	0,2429
Cabal n+1 (CFM)	31,2	31,2	29,25
Cabal n+1 (m³/s)	0,0147	0,0147	0,0138
v_{entrada} (m/s)	2,627	2,670	2,872
v_{sortida} (m/s)	0,859	0,830	0,802

Re_{entrada}	830	851	915
Re_{sortida}	2170	2117	2044
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,020	0,020	0,018
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,90	0,88	0,87

Taula 7.15 Resultats comparatius estudi bypass inferior de ranures

En aquest cas, treure superfície d'entrada no és factible ja que es perd cabal d'aire i es redueix la viscositat turbulenta tant a l'entrada com a la sortida. Les línies inferior doncs queden fixades a la seva longitud original.

Ara calia refinar la línia superior de forats. Primerament, calia comprovar la hipòtesi realitzada anteriorment que aquesta línia era més efectiva si es localitzava per sobre el BMS. Així, s'ha procedit a comparar els resultats anteriors (línia vermella) amb una simulació on la línia superior estigui localitzada per sota el BMS (línia blava) i una altra on no hi hagi tal línia (sense les línies vermella i blava) (*Figura 7.26*).

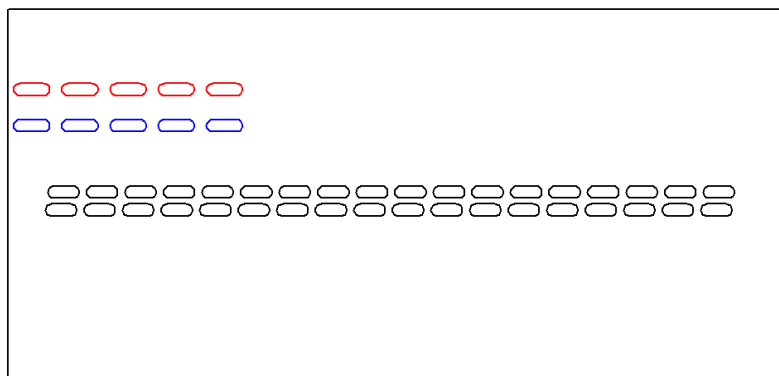


Figura 7.26 Esquema dels tres casos d'estudi de posició línia superior

A la *Taula 7.16* es poden veure comparats els tres resultats:

	Vermella	Blava	Cap de les dues
Global Temperature (°C)	59,19	59,38	59,58
Surface Temperature (°C)	58,50	58,80	58,52
Static Pressure sortida (Pa)	101269,84	101273,22	101267,59
Caball n (m³/s)	0,0150	0,0145	0,0123
ΔP (Pa)	58,49	55,89	60,36
ΔP (in h₂O)	0,2350	0,2246	0,2426
Caball n+1 (CFM)	31,2	32,25	24,3
Caball n+1 (m³/s)	0,0147	0,0152	0,0115
v_{entrada} (m/s)	2,627	2,892	2,453
v_{sortida} (m/s)	0,859	0,830	0,704
Re_{entrada}	830	922	782
Re_{sortida}	2170	2118	1796
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,020	0,019	0,017
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,90	0,89	0,24

Taula 7.16 Resultats comparatius estudi de posició línia superior

Amb aquests resultats queda comprovada la hipòtesi, tot i que el cas de la simulació sense línia superior ha donat valors molt semblants en el paràmetre de la temperatura de la superfície al cas vermell. Això fa pensar que hi pot haver una combinació amb menys ranures a la línia superior que sigui més eficient.

Així doncs a continuació i per finalitzar les simulacions s'ha simulat diferents configuracions de forats eliminant els més davanters per tal d'afinar el nombre òptim. Per a això, s'ha comparat l'existent (incloent-hi la blava i la vermella) amb dues simulacions: una on s'ha eliminat una ranura (s'ha eliminat la ranura vermella), i una altra amb dues ranures menys que en el cas existent (s'han eliminat la vermella i la blava) (*Figura 7.27*).

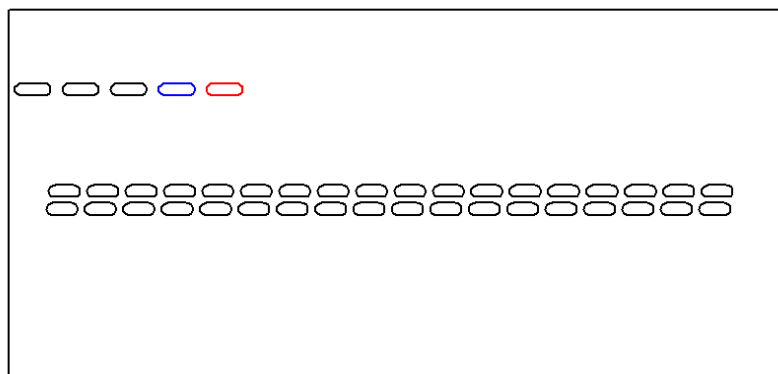


Figura 7.27 Esquema dels tres casos d'estudi de configuració línia superior

A la *Taula 7.17* es poden veure comparats els tres resultats:

	Completes	Sense la vermella	Sense la vermella i la blava
Global Temperature (°C)	59,19	59,17	59,18
Surface Temperature (°C)	58,50	58,54	58,55
Static Pressure sortida (Pa)	101269,84	101270,43	101270,58
Cabal n (m³/s)	0,0150	0,0145	0,014
ΔP (Pa)	58,49	57,83	57,63
ΔP (in h₂O)	0,2350	0,2324	0,2316
Cabal n+1 (CFM)	31,2	31,5	31,5
Cabal n+1 (m³/s)	0,0147	0,0148	0,0148
V_{entrada} (m/s)	2,627	2,603	2,578

v_{sortida} (m/s)	0,859	0,830	0,801
Re_{entrada}	830	830	821
Re_{sortida}	2170	2117	2044
Turbulent Viscosity Entrada (Pa/s)	0,020	0,020	0,021
Turbulent Viscosity Sortida (Pa/s)	0,90	0,80	0,77

Taula 7.17 Resultats comparatius estudi de configuració línia superior

Com es pot observar, pràcticament no hi ha diferència en els resultats i, en cas, d'existir és a pitjor. Per tant, s'ha decidit fixar també el nombre de ranures i la seva posició per així fixar ja totes les posicions de les entrades d'aire.

7.4. Anàlisi solució final

A continuació es llisten totes les variacions que s'han fet a la bateria des de la simulació bàsica de la bateria del CAT09e com a resultat de totes les simulacions:

- S'han arrodonit tots els forats possibles a l'interior de la bateria.
- S'ha apujat el BMS de 10 mm a 18 mm sobre la tapa dels *stacks*.
- S'ha variat l'encastament del coure de 1 mm a 0,7 mm.
- S'han substituït els forats davanters dels *stacks* per ranures contínues.
- Els forats laterals s'han optimitzat geomètricament amb ranures.
- S'ha optimitzat la seva distribució.

A continuació, es pot veure un esquema acotat de la posició de les ranures laterals després de totes les modificacions:

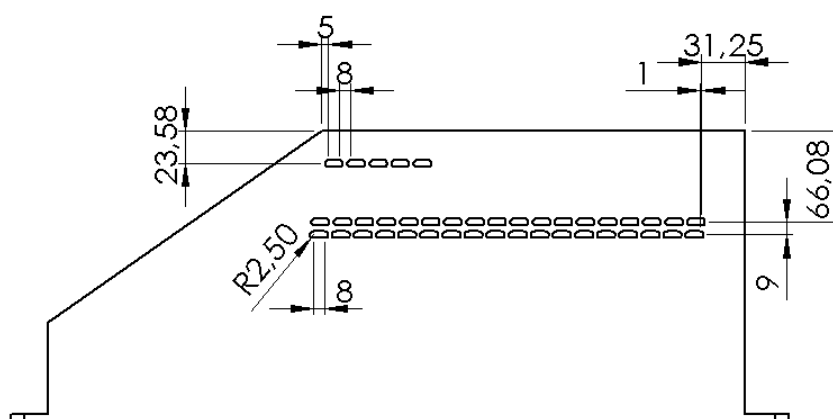


Figura 7.28 Plànol distribució de ranures CAT09e

Seguidament també es mostren diferents imatges amb una representació de temperatures en la superfície de sensat (*Figura 7.29*) i una altra amb les línies de corrent del fluid (*Figura 7.30*). En aquestes figures es pot veure com la distribució de temperatures localitza el seu màxim en la part central, cosa esperada per com està dissenyada la ventilació.

També es pot veure una major aspiració de l'aire que circula per l'interior dels *stacks* per part dels ventiladors de la línia superior.

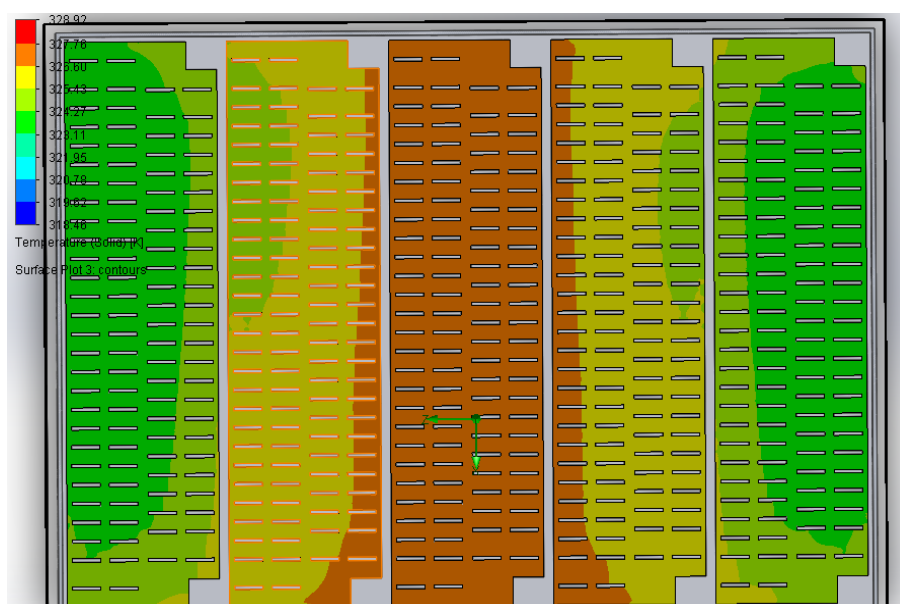


Figura 7.29 Representació de temperatures en la superfície de sensat

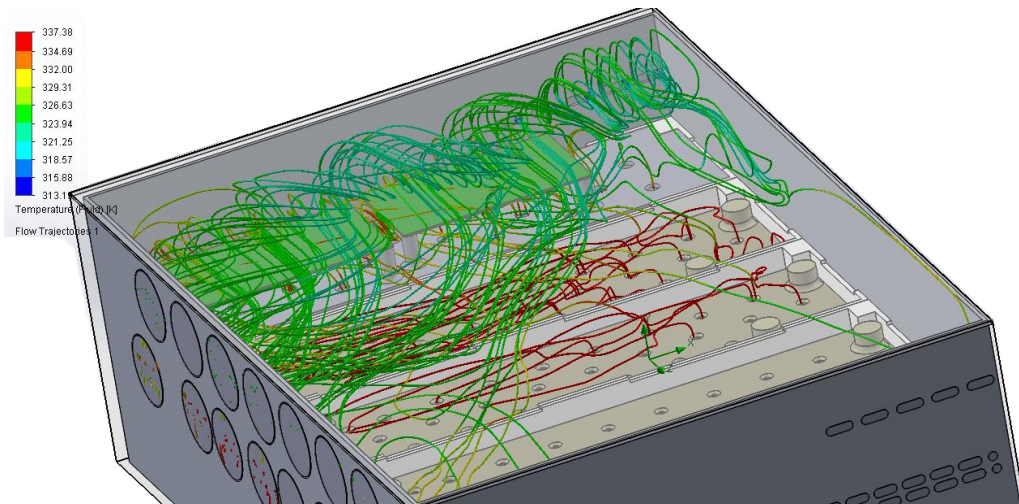


Figura 7.30 Línies de corrent de la refrigeració del CAT09e

En la *Figura 7.31*, en canvi, es pot apreciar la distribució de temperatures del CAT09e en un tall de secció. L'escala és la mateixa que la de la *Figura 7.12* per tal de poder fer-se una comparació a simple vista on queda clar la gran millora obtinguda.

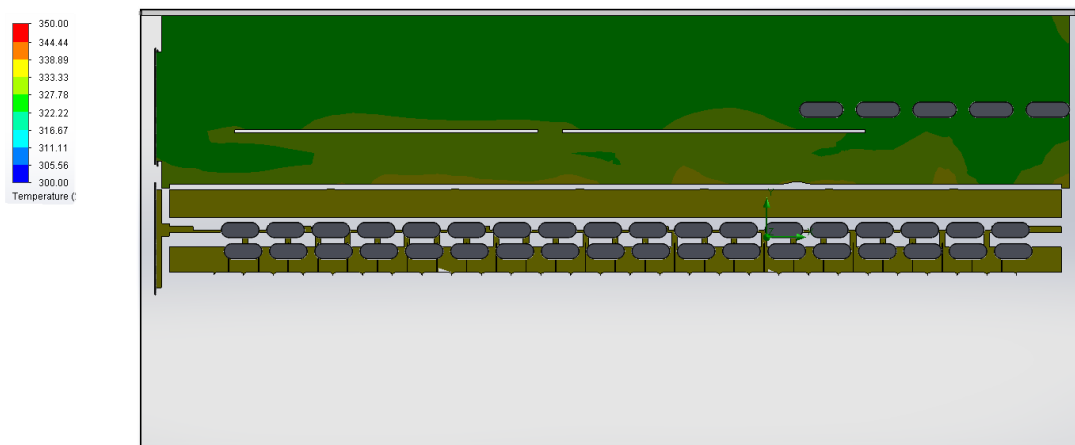


Figura 7.31 Distribució de temperatures del CAT09e en un tall de secció

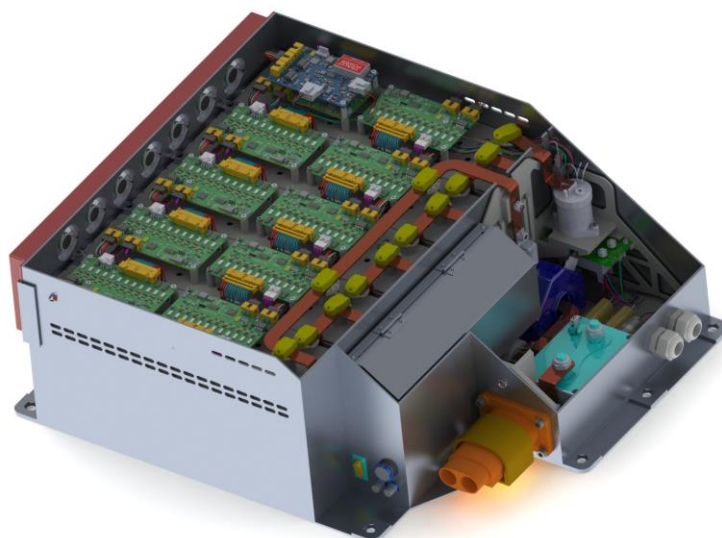


Figura 7.32 Bateria del CAT09e

8. Conclusions

La conclusió final d'aquest projecte és que s'ha aconseguit millorar la refrigeració de la bateria del CAT09e en tots els aspectes en major o menor mesura. Aquest fet ha permès reduir la temperatura de funcionament dels 76°C de la bateria del CAT08e als 58,5°C per a la bateria del CAT09e.

8.1. Anàlisi de resultats

El principal objectiu d'aquest projecte era millorar la refrigeració de la bateria del CAT08e per tal d'implementar-la al CAT09e i que aquesta no superés els 60°C en funcionament. Per a fer-ho s'ha dividit la tasca en tres grans blocs: Reduir la generació, extreure un major cabal d'aire i augmentar-ne la eficiència.

Dintre del primer punt s'han diferenciat tres punts clau: les cel·les, les bus-bars i el contacte entre unes i altres. Del seu estudi se n'extreuen les següents conclusions:

- S'ha trobat un model de cel·la que redueix les pèrdues en forma de calor i augmenta la seva energia amb el qual s'està treballant per a poder-lo implementar en futurs dissenys.
- El canvi de secció de les bus-bars de 10 a 12 mm ha permès reduir força la generació en aquest element tot i que té el handicap d'augmentar el pes de la bateria, tot i això, es creu necessari ja que així també s'augmenta la superfície del contacte entre born i bus-bar.
- Els experiments han posat de manifest que la generació de calor pel contacte era de, com a mínim, el mateix ordre de magnitud que el de les cel·les.
- Els resultats del primer bloc d'experiments fan concloure que la distribució de cargols és de vital importància per aconseguir una pressió uniformement distribuïda i optimitzar així el contacte.
- El segon bloc d'experiments, en canvi, fa concloure que l'aplicació de pasta termoconductora en el contacte no aporta una millora clara ja que amb la millora en la pressió del contacte, aquest, ja era prou bo.

Pel que es refereix a extreure un major cabal d'aire de la bateria se'n conclou el següent:

- S'ha aconseguit extreure un 280% més de cabal d'aire respecte la temporada passada amb el mateix consum elèctric.

En el darrer punt d'estudi del treball, s'ha emprat el programari FlowSimulation de SolidWorks per tal de simular la bateria per a optimitzar-la. D'aquestes simulacions comparatives, es pot concloure el següent:

- El nou concepte per a la refrigeració del CAT09e és un bon concepte ja que es redueixen més de 11°C respecte la del CAT08e.
- En la fase d'optimització s'ha aconseguit reduir la pèrdua de càrrega considerablement gràcies als arrodoniments i ha augmentat la secció de pas del fluid. Això ha fet augmentar el cabal que, com a conseqüència ha reduït la temperatura en prop de 4°C.
- En l'apartat de trobar la millor geometria, configuració i distribució dels forats d'entrada d'aire, sustentar-se sobre la base teòrica d'augmentar la difusió turbulenta del sistema, ha permès reduir la temperatura de funcionament de la caixa en 2°C.

8.2. Futures línies de treball

Durant la realització d'aquest treball s'han trobat línies de futura millora en les que ja s'està investigant així com recomanacions per al futur que s'extreuen de l'experiència que aquest treball ha proporcionat.

En primer lloc es recomana el canvi de cel·les proposat a l'apartat 5.1 ja que fa millorar el monoplaça en aspectes no només de potència dissipada, sinó també en l'aspecte de l'energia.

Dels experiments, es dedueix que el contacte per pressió no és la millor manera de realitzar-lo ja que provoca pèrdues del mateix ordre de magnitud que les cel·les. Des d'aquest projecte es fa una recomanació ferma per fer la connexió per soldadura per ultrasons de manera que es soldin els borns de les cel·les o a una bus-bar o directament a una placa de circuit imprès (pcb) de potència.

Això si bé seria un gran avanç pel que fa a temes tèrmics, té el gran desavantatge que si succeeix algun problema amb una cel·la, aquesta no es podria canviar com amb la configuració actual, sinó que s'hauria de substituir tot un *stack* pel fet d'estar soldades. Això suposa un gran augment del cost econòmic, però un gran avantatge.

La darrera recomanació té a veure amb l'aspecte de les simulacions. Si bé el SolidWorks té grans avantatges, el model de turbulència és un handicap important que, si es vol afinar més els resultats, caldrà variar. Això no és possible en aquest programari ja que és programari comercial tancat. És per això, que es recomana fer el salt al OpenFoam. Un programari lliure que permet modificar el model de turbulència a voluntat. La dificultat rau en el punt d'aconseguir importar la geometria amb el mallat des de SolidWorks cap a OpenFoam. Es recomana importar el mallat ja que el que realitza el SolidWorks és automàtic i de molt bona qualitat cosa que simplifica una qüestió molt complicada.

9. Estudi econòmic

El projecte es basa en la millora de la refrigeració del monoplaça per tres grans vies, la teòrica, la experimental, i la de simulacions amb CFD.

Es poden diferenciar dos grans blocs de costos. El primer els costos de disseny i simulació del projecte, i l'altre, els costos dels experiments realitzats al laboratori.

Pel que fa als primers són els costos derivats dels recursos humans, és a dir, les hores d'enginyeria dedicades al disseny de la refrigeració i a la preparació i extracció i anàlisi de resultats tant de les simulacions com dels experiments. També s'han tingut en compte les hores de simulació així com els costos del programari.

Concepte	Quantitat	Preu unitari	Cost
Disseny i millora de la refrigeració del CAT09e	340 hores	45 €/h	15300 €
Simulacions	523 hores	10 €/h	5230 €
Amortització d'equips informàtics	1 unitat	125 €/unitat	125 €
Amortització de llicències del programari emprat	1 unitat	250 €/unitat	250 €
Total:			20905 €

Taula 9.1 Anàlisi de costos de recursos humans i informàtics

El segon gran bloc, el componen els materials necessaris per a dur a terme els experiments.

Concepte	Quantitat	Preu unitari	Cost
Placa de connexions de sinteritzat de poliamida	78,53 cm ³	1 €/cm ³	78,53 €
Bus-bars de coure	0,224 Kg	7,1 €/kg	1,60 €
NTCs	20	0,05 €/unitat	1 €
Cable	12 m	2,50 €/m	30 €
Múltímetre	1	124 €	124 €

Càrrega electrònica	1	900 €	900 €
Arduino Mega 2560	1	30 €	30 €
Font de tensió	1	230 €	230 €
Cinta aïllant	1	20 €	20 €
Loctite	1	20 €	20 €
Total:			1435,13 €

Taula 9.2 Anàlisi de costos de material de l'experiment

Els costos totals del projecte són per tant de 22340,13 €.

10. Impacte ambiental

Aquest projecte no té una gran influència pel medi ambient, atès que en gran part, només modifica peces ja dissenyades per tal de fer la refrigeració més eficient. Ara bé, si que hi ha materials que es fan servir per a la refrigeració com són els ventiladors o materials emprats per a la construcció de l'experiment.

Els primers són de plàstic i altament reciclables tot i les llargues vides útils que tenen (més de 6000 h en funcionament). Per l'experiment s'ha fet servir sinteritzat amb poliamida, un plàstic en pols altament reciclable ja que només cal triturar-lo. També ha estat el material escollit per al xassís dels ventiladors. Les bus-bars de coure també són completament reciclables.

Tanmateix, la realització del projecte té alguns efectes mediambientals adscrits al consum energètic i d'utilització de material d'oficina durant la fase de disseny. Els primers s'ha de tenir en compte que poden provenir de centrals on s'alliberen emissions de CO_2 a l'atmosfera, les quals contribueixen en el canvi climàtic. Les segones, s'ha emprat paper, llapis, bolígraf, per tal de plasmar idees o imprimir documents importants.

Per acabar, dir que la finalitat d'aquest projecte és en part reduir les pèrdues energètiques de la bateria per així no malgastar potència i obtenir un consum més responsable dels recursos.

11. Planificació del projecte

La planificació del projecte s'ha marcat des de l'inici per tal d'estructurar el temps de la millor manera possible.

En la fase preliminar del projecte es va analitzar la bateria del CAT08e per tal de trobar els camins de millora. Seguidament es va atacar la part de reduir la potència generada, amb la excepció de l'experiment pel fet que aquest havia d'ésser dissenyat a partir del disseny de la bateria i calia construir-lo, i la part d'extreure un major cabal d'aire ja que eren aspectes que més influenciaven a la resta de membres de l'equip.

Per acabar la tasca d'optimitzar via simulació i la de construir i experimentar es van dur quasi en paral·lel.

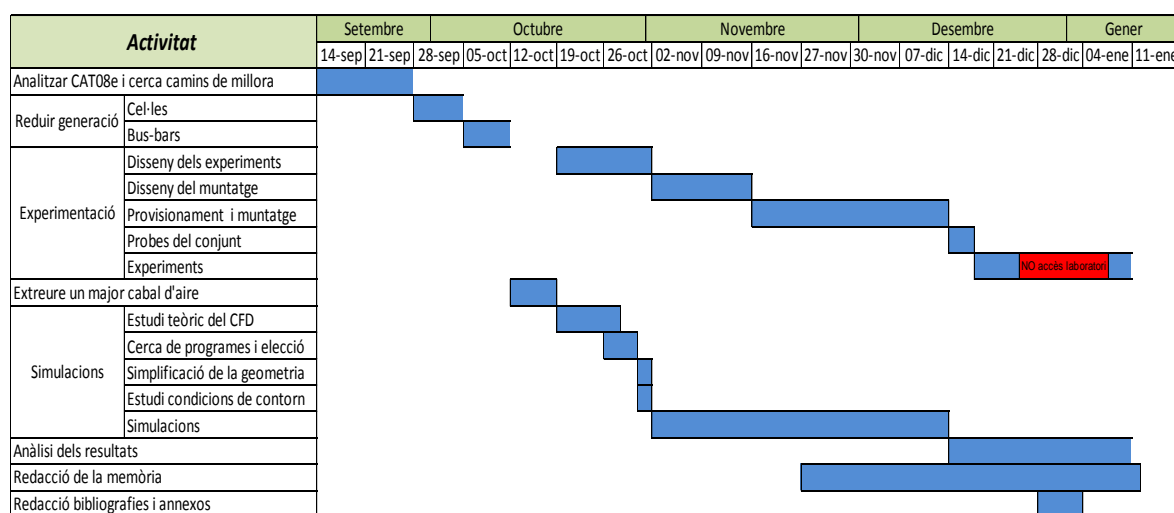


Figura 11.1 Diagrama de Gantt del projecte

Cal aclarir que la franja vermella en la activitat dels experiments ha estat provocada pel fet que la autorització del departament de control d'accessos de la UPC no va arribar a temps. Aquest fet ha endarrerit molt la planificació havent d'allargar fases com l'anàlisi de resultats o la redacció de la memòria.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair al professor Vicente de Medina Iglesias pel seu suport consells i dedicació sense els quals aquest projecte no hagués estat possible. També agrair al professor Rafael Ruíz la seva ajuda i consells així com la ajuda i disposició alhora d'aconseguir material per a l'experiment.

Agrair també als meus companys d'equip per la seva ajuda incondicional en tot el que he necessitat i especialment a Manel Duran i Moles, sense l'ajut i coneixements del qual no s'haguessin pogut dur a terme els experiments i a Víctor Calvo Serra, ja que gràcies al seu projecte s'han pogut extreure dades molt valuoses per tal de dimensionar les pèrdues.

Per acabar, agrair a tots els amics i família per la seva paciència i suport en tot el que he necessitat durant aquest temps.

A tots, moltes gràcies per haver fet possible aquest projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] SAE INTERNATIONAL: 2015 FSAE Rules
- [2] OrionFans: OD2510 Series Datasheet.
- [3] AVX: NTC Disc Thermistor ND03/06/09 NE03/06/09 NV06/09
- [4] OrionFans: OD4020 Series Datasheet
- [5] MELASTA: SLPBA843126 3,7 V 6350 mAh 15C Datasheet
- [6] Emrax 228 HV, Enstroj. Datasheet
- [7] Caracterització i Simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student. Víctor Calvo
- [8] MELASTA: SLPBB042126 3,7 V 6600 mAh 15C Datasheet
- [9] <http://www.electronics-cooling.com/2013/03/benefits-and-drawbacks-of-using-two-phase-cooling-technologies-in-military-platforms/>
- [10] Timtronics, High Quality Thermally Conductive Materials, Datasheet
- [11] Guasch. Componentes y Electrónica de Potencia, TzCn Pasta Termoconductora Datasheet
- [12] American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc, *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 2009.
- [13] Hoffman, Joe D., and Steven Frankel. *Numerical methods for engineers and scientists*. CRC press, 2001.
- [14] Runchal, Akshai K. "Brian Spalding: CFD and reality—A personal recollection." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.17 (2009): 4063-4073.
- [15] Nikrityuk, Petr A. *Computational Thermo-Fluid Dynamics: In Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2011.

- [16] LeVeque, Randall J. *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Vol. 31. Cambridge university press, 2002.
- [17] Zienkiewicz, Olgierd Cecil, et al. *The finite element method*. Vol. 3. London: McGraw-hill, 1977.
- [18] Kolmogorov, Andrey Nikolaevich. "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers." *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. Vol. 30. No. 4. 1941.
- [19] Pope, Stephen B. *Turbulent flows*. Cambridge university press, 2000.
- [20] Smagorinsky, Joseph. "General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment*." *Monthly weather review* 91.3 (1963): 99-164.
- [21] SPALART, P., and S. ALLMARAS. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows."
- [22] https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper.pdf
- [23] Ferziger, Joel H., and Milovan Peric. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [24] Mittal, Rajat, and Gianluca Iaccarino. "Immersed boundary methods." *Annu. Rev. Fluid Mech.* 37 (2005): 239-261.

Bibliografia complementària

Peter A. Davidson. *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Oxford 2004.

Wolfgang Rodi. *Turbulence models and their application in hydraulics*. New York 1993

www.etseib-motorsport.upc.edu